

Rangelo Joanito

Exploração e caracterização de minerais pesados de
Moma, Moçambique.



Universidade de Aveiro
2014

Universidade do Porto
2014

Departamento de Geociências

Departamento de Geociências, Ambiente e
Ordenamento do Território

RangelJo Joanito

**Exploração e caracterização de minerais pesados de
Moma, Moçambique.**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Geomateriais e Recursos Geológicos, realizada sob a orientação científica da Doutora Maria do Rosário Mascarenhas de Almeida Azevedo, Professora Auxiliar do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro e do Doutor Fernando Ernesto Rocha de Almeida, Professor Associado do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro (UA – Portugal).

Dedico este trabalho a minha Esposa e meus filhos por todo amor, dedicação e confiança que sempre tiveram em mim na minha ausência.

o júri

Presidente

Professora Doutora Beatriz Valle Aguado
Professora associado da Universidade Aveiro

Professora Doutora Maria Ângela de Carvalho Fernandes de Almeida
Professora auxiliar da Universidade do Porto

Professora Doutora Maria do Rosário Mascarenhas de Almeida Azevedo
Professora auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

A minha mãe, sobretudo pelos apoios morais sem os quais este trabalho não seria possível.

Ao meu pai em memória!

À minha Orientadora

Professora Doutora Maria do Rosário Azevedo pela disponibilidade, amabilidade, estímulo e incentivo sempre demonstrados para a realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor Fernando de Almeida que incentivou as ideias inicialmente propostas e garantiu que fossem desenvolvidas sob a sua co-orientação disponibilizando algum material científico necessário.

À Universidade Pedagógica de Moçambique, pela concessão da bolsa de estudos para o mestrado em Geomateriais e Recursos Geológicos- Portugal.

À minha família em especial à minha esposa e meus filhos pela compreensão da minha ausência durante esta minha trajetória.

À colega Telma pelo seu acompanhamento cuidadoso em todas as etapas da separação magnética das amostras, o meu muito obrigado.

À Mestre Maria Cristina Sequeira e Denise Lara Gomes Terroso pela disponibilidade demonstrada e apoio na difração de raios-x e no mapeamento das amostras no Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro o autor agradece a colaboração prestada.

Ao meu amigo António pela sua disponibilidade e apoio a tempo inteiro na elaboração de algumas cartas geológicas, vai um muito obrigado.

Aos Professores do Departamento de Geociências pela boa honestidade e ensinamentos transmitidos.

A todos amigos, colegas do curso e familiares que de uma forma ou de outra me estimularam ou ajudaram-me e que possibilitaram a conclusão desta dissertação.

Á Deus, por me dar forças nos momentos mais difíceis desta caminhada.

Muito obrigado!

palavras-chave

Jazida de Moma, minerais pesados com interesse económico, zircão, ilmenite, rútilo, monazite.

resumo

Moçambique é um dos países onde a actividade extractiva de minerais pesados tem conhecido maior desenvolvimento. Os depósitos de minerais pesados com interesse económico (EHM) ocorrem essencialmente associados a “placers” de praia ou ao retrabalhamento destes pelo vento (dunas costeiras e dunas interiores), dispostos ao longo da linha de costa.

No distrito costeiro de Moma (Província de Nampula), os sedimentos de cobertura, de idade Quaternária (Pleistocénico-Holocénico), resultaram maioritariamente do dismantelamento de rochas precâmbricas (meso- e neoproterozóicas) do cinturão móvel de Moçambique e estão fortemente enriquecidos em ilmenite, rútilo e zircão.

A actividade de exploração de EHM na jazida de Moma iniciou-se em 2007 com a extracção de areias nas cadeias de Dunas Altas de Topuito e Tebani, estando presentemente centrada no depósito de Namalope. A jazida, concessionada à empresa Kenmare Resources constitui um dos principais reservatórios de titânio e de zircónio do planeta

Neste depósito, a extracção das areias pesadas é feita por dragagem a céu aberto num lago artificial de água doce, usando duas dragas ligadas a um concentrador húmido flutuante (“WCP”), onde se processa a primeira fase de separação granulométrica e a obtenção de concentrados de minerais pesados (“HMC”) através de métodos gravíticos. Em seguida, os concentrados “HMC” são transferidos para a Unidade de Separação Mineral (“MSP”), onde se procede à separação e recuperação da ilmenite (fracção magnética), do rútilo (condutor) e do zircão (fracção não magnética) utilizando métodos magnéticos, electroestáticos e gravíticos. A monazite tende a acompanhar o zircão em todas as etapas de separação e acaba por ficar incorporada na fracção rica em zircão. A investigação desenvolvida no âmbito da presente dissertação incidiu em quatro amostras de concentrados de zircão fornecidos pela empresa e teve como principal objectivo caracterizar as associações de minerais pesados presentes nestas amostras, recorrendo a técnicas de separação magnética, gravimétrica, difracção de Raios X e microscopia electrónica de varrimento. Foram testados também dois esquemas de separação para isolar a monazite do zircão.

Os resultados obtidos revelaram que os processos de purificação levados a cabo na empresa são extremamente eficientes e permitem remover quase completamente a ilmenite e grande parte do rútilo nos concentrados finais de zircão. Mostraram ainda que a passagem destes concentrados no separador magnético de Frantz, a uma intensidade de campo de 1,2 A, inclinação vertical da calha de 15° e lateral de 6° constitui o esquema mais eficaz para separar a monazite do zircão.

keywords

Moma deposit, economic heavy minerals, zircon, ilmenite, rutile, monazite.

abstract

Mozambique is endowed with large resources of economic heavy minerals (EHM). The EHM deposits occur primarily associated with beach placers and aeolian sand systems (coastal dunes and inland dunes) distributed along the shoreline.

In the coastal district of Moma (Nampula Province), these sediment cover deposits were formed during the Quaternary (Pleistocene-Holocene) by dismantling of Precambrian igneous and metamorphic rocks (Meso- and Neoproterozoic) belonging to the Mozambique Pan-African mobile belt and are strongly enriched in ilmenite, rutile and zircon.

The EHM exploration activity in the Moma mine began in 2007 with the extraction of sands from the Topuito and Tebani dune chains and is currently focused on the Namalope deposit. The deposits, licensed to the company Kenmare Resources, constitute one of the main world reservoirs of titanium and zirconium.

At Moma, dredge mining takes place in an artificial freshwater pond by two dredges, which feed a single Wet Concentrator Plant (WCP), where screening and progressive stages of spiral gravity separation allow the production of heavy mineral concentrates (HMC). The HMC concentrates are then transferred and fed into the Mineral Separation Unit (MSP). In the MSP, the HMC concentrates are dried and passed through high intensity magnets to separate ilmenite (magnetic fraction) from non-magnetic minerals (rutile and zircon). The non-magnetic fraction is then passed through a wet gravity separation circuit in order to remove any undesirable minerals. Finally, electrostatic separators are used to separate rutile (conducting) from zircon (non-conducting). Monazite tends to follow zircon in all stages of separation and becomes incorporated into the zircon-rich fraction.

The research carried out in the scope of this dissertation was focused on four samples of zircon concentrates supplied by the company and its main objective was to characterize the heavy mineral assemblages of the studied samples using magnetic separation, gravity, x-ray diffraction and scanning electron microscopy techniques. Two separation schemes have also been tested to isolate monazite from zircon.

The results obtained show that procedures used by the company for zircon recovery are extremely efficient, leading to an almost complete removal of ilmenite and rutile from the final zircon concentrates. It is also concluded that the best conditions for separating monazite from zircon in the Frantz magnetic separator were achieved with the chute aligned at a forward slope of 15° and a side slope of 6°, at a field intensity of 1.2 A.

ÍNDICE GERAL

	Págs.
CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO.....	1
I.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	3
I.2. OBJECTIVOS DO TRABALHO.....	4
I.3. METODOLOGIA DE TRABALHO.....	5
I.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	6
CAPÍTULO II: ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO.....	7
II.1 GRANDES UNIDADES TECTONO-ESTRATIGRÁFICAS DE MOÇAMBIQUE.....	9
II.2 O CINTURÃO MÓVEL DE MOÇAMBIQUE.....	11
II.2.1 O COMPLEXO DE NAMPULA.....	12
II.2.2 TERRENOS EXÓTICOS ALÓCTONES NEOPROTEROZÓICOS.....	14
II.2.3 SEQUÊNCIAS SUPRACRUSTAIS NEOPROTEROZÓICAS.....	14
II.2.4 GRANITÓIDES NEOPROTEROZÓICOS.....	15
II.2.5 COBERTURA FANEROZÓICA.....	15
II.3. A REGIÃO DE MOMA	17
CAPÍTULO III: A JAZIDA DE MOMA.....	23
III.1 INTRODUÇÃO.....	25
III.2 A JAZIDA DE MOMA.....	28
III.3 EXPLORAÇÃO MINERAL EM MOMA.....	31
III.3.1 EXTRACÇÃO DE AREIAS PESADAS.....	31
III.3.2 CONCENTRAÇÃO DOS MINERAIS PESADOS.....	33
III.3.3 ARMAZENAMENTO E TRANSPORTE.....	33
III.4 SONDAGENS.....	34
CAPÍTULO IV: MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
IV.1 AMOSTRAGEM.....	41
IV.2. DIFRAÇÃO DE RAIOS X.....	41
IV.3. SEPARAÇÃO DE ZIRCÕES E MONAZITES NA AMOSTRA ZSG.....	44
IV.3.1. SEPARAÇÃO MAGNÉTICA.....	44
IV.3.2. SEPARAÇÃO POR DENSIDADE (BROMOFÓRMIO).....	45
IV.3.3. NOVA SEPARAÇÃO MAGNÉTICA.....	46
IV.3.4. SEPARAÇÃO POR DENSIDADE (IODETO DE METILENO).....	47

IV.3.5. OBSERVAÇÃO À LUPA BINOCULAR.....	48
IV.4. SEPARAÇÃO MAGNÉTICA DAS RESTANTES AMOSTRAS.....	49
IV.5. CONTAGEM DOS GRÃOS À LUPA BINOCULAR.....	49
IV.6. ANÁLISES NO MICROSCÓPIO ELECTRÓNICO DE VARRIMENTO (MEV).....	50
IV.7 TRATAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS.....	50
CAPÍTULO V: RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	51
V.1 INTRODUÇÃO.....	53
V.2 MINERAIS PESADOS.....	53
V.3 ILMENITE, RÚTILO, ZIRCÃO, MONAZITE E TURMALINA.....	55
V.4. OBSERVAÇÃO À LUPA BINOCULAR.....	57
V.5. SEPARAÇÃO MAGNÉTICA.....	58
V.6. DIFRAÇÃO DE RAIOS X.....	62
V.7. MICROSCÓPIO ELECTRÓNICO DE VARRIMENTO (MEV).....	63
V.8. CONCLUSÕES.....	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
II.1 Mapa simplificado da África Austral, mostrando a distribuição dos principais cratões e cinturões móveis (adaptado de Hanson, 2003).	10
II.2 Reconstrução da Gondwana no final do Neoproterozóico (extraído de Hoffman, 1991, Fitzsimons, 2000 e Hanson, 2003). C - Cratão do Congo; K - cratão do Kalahari (cratões de Kaapvaal, Zimbabwe e Grunehogna + blocos Paleoproterozóicos); SF – cratão de São Francisco.....	11
II.3 Mapa geológico simplificado do Nordeste de Moçambique mostrando as principais unidades litoestratigráficas em que é subdividido (extraído de Norconsult Consortium, 2007, Macey <i>et al.</i> , 2007, Grantham <i>et al.</i> , 2007).....	12
II.4 (a) Gondwana central há cerca de 200 Ma. Os terrenos afectados pela orogenia Pan-Africana estão indicados com cor cinzenta escura. (b-c) Fragmentação da Gondwana aos 140 Ma e 90 Ma, mostrando as rochas vulcânicas do Jurássico e Cretácico a preto. CUG – Graben de Chire-Urema; DFZ – Zona de Fractura Davie; Moz. Basin – Bacia de Moçambique (extraído de Emmel <i>et al.</i> , 2011).....	16
II.5 Mapa geológico simplificado da região de Moma.....	18
II.6 Distribuição das diferentes unidades morfológicas na orla costeira de Moma.....	19
II.7 Esquema simplificado mostrando a distribuição das diferentes unidades estratigráficas presentes nos depósitos quaternários de Moma.....	20
III.1 Diagrama esquemático mostrando a formação de vários tipos de “placers” (extraído de Miners, 2011).....	26
III.2 Diagrama esquemático mostrando a formação de “placers” de praia e marinhos.....	26
III.3 Distribuição das diferentes unidades morfológicas na orla costeira de Moma.....	29
III.4 Vista parcial das dunas altas vermelhas do interior do depósito de Nataka (Dunas Altas de Topuito e Tebani).....	30
III.5 Dunas de Topuito.....	30
III.6 Vista parcial da planície de Namalope.....	30

III.7	Diagrama esquemático mostrando a sequência de operações envolvida na exploração do depósito de Namalope.....	31
III.8	Vista geral do lago artificial onde estão localizadas as dragas e o concentrador húmido flutuante ("WCP"). Cedido pela empresa Kenmare Resources em 2013.....	32
III.9	Outro aspecto do lago artificial onde estão localizadas as dragas e o concentrador húmido flutuante ("WCP"). Cedido pela empresa Kenmare Resources em 2013.....	32
III.10	Vista da Unidade de Separação ("MSP"). Cedido pela empresa Kenmare Resources em 2013.....	34
III.11	Silos de armazenamento e tapete rolante.....	34
III.12	Mapa de localização de sondagens e furos de amostragem do solo). Cedido por Langa, Geólogo da empresa Kenmare Resources em 2013.....	35
III.13	Aspecto da máquina de perfuração EVH de fabrico Australiano.....	35
III.14	Aspecto dos "calícos"	36
III.15	Separação á bateia.....	36
III.16	Armazém das amostras recolhidas em sondagens.....	37
III.17	Separação à bateia no laboratório da empresa (2013).....	38
III.18	Laboratório de separação magnética instalado na Unidade de Separação ("MSP").....	38
IV.1	Derivação da Lei de Bragg.....	42
IV.2	Preparação de amostras para a Difraccção de raios X.....	43
IV.3	Laboratório de Difraccção de raios X do Departamento de Geociências.....	44
IV.4	Separador Magnético Frantz.....	45
IV.5	Material usado na separação com bromofórmio.....	46
IV.6	Sequência de procedimentos usados na separação magnética.....	47
IV.7	Material usado na separação com iodeto de metileno.....	48
IV.8	Lupa binocular WILD utilizada na observação dos concentrados de minerais pesados.....	49
IV.9	Esquema de separação magnética.....	49
V.1	Concentrado de zircão da amostra ZCF.....	57

V.2	Concentrado de zircão da amostra HAL N/M.....	57
V.3	Concentrado de zircão da amostra ZSG.....	57
V.4	Concentrado de zircão da amostra RUT/NC.....	57
V.5	Fracção magnética (1,2 A) da amostra ZCF.....	59
V.6	Fracção magnética (1,2 A) da amostra HAL N/M.....	59
V.7	Fracção magnética (1,2 A) da amostra RUT/NC.....	59
V.8	Fracção magnética (1,2 A) da amostra RUT/NC.....	59
V.9	Esquema de separação por densidade e susceptibilidade magnética aplicado à amostra ZSG.....	61
V.10	Difractogramas obtidos para a amostra ZSG. (a) concentrado original, (b) fracção rica em zircão, (c) fracção rica em monazite.....	63
V.11	Espectros MEV/EDS de cristais de zircão da amostra ZCF (concentrado original). Silício (vermelho); zircónio (verde), fósforo (azul).....	65
V.12	Espectros MEV/EDS de cristais de rútilo e monazite da amostra ZCF (concentrado original).....	67
V.13	Imagens MEV/EDS de cristais de zircão, monazite e rútilo na fracção magnética da amostra ZCF. Zircónio (verde), cério (roxo), titânio (laranja).....	68

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela		Pág.
III.1	Características dos principais depósitos de minerais pesados da região Norte de Moçambique (extraído de Afonso & Marques, 1993).....	28
V.1	Estabilidade dos minerais pesados mais comuns (Pettijohn <i>et al.</i> , 1987).....	55
V.2	Abundâncias relativas de minerais pesados nas amostras estudadas.....	58
V.3	Abundâncias relativas de minerais pesados na fracção magnética extraída a uma intensidade de corrente de 1,2 A.....	60
V.4	Comparação das abundâncias relativas de minerais pesados no concentrado original (ZSG-t) e nas fracções de zircão (ZSG-zr) e de monazite (ZSG-mo) extraídas da amostra ZSG seguindo o esquema da Figura V.9.....	60
V.5	Composições químicas dos cristais de zircão da amostra ZCF (concentrado original).....	64
V.6	Composições químicas dos cristais de rútilo e monazite da amostra ZCF (concentrado original).....	66

SIMBOLOGIA USADA:

UA - Universidade de Aveiro

UPM - Universidade Pedagógica de Moçambique

Ma - Milhões de anos

EAO - Orógeno Este Africano

TTG - Tonalito-Trondjemito-Granodiorito

NMM- Nível médio do mar

EHM - “*Economic heavy minerals*” - Minerais Pesados de interesse económico

WCP - Concentrador húmido flutuante

HMC - “*Heavy mineral concentrates*” - Concentrados de minerais pesados

EVH – Marca da máquina de perfuração de fabrico Australiano

ID - Identificador autonumérico sequencial de linha ou ponto

MP - Minerais Pesados

XRD- Difracção de Raios-X

MEV- Microscópio eletrónico de varrimento

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO

A dissertação para a obtenção do título de mestre em Geomateriais e Recursos Geológicos (2º Ciclo de Estudos) da Universidade de Aveiro / Universidade do Porto que aqui se apresenta intitula-se “*Exploração e caracterização de minerais pesados de Moma, Moçambique*”. O trabalho foi realizado no âmbito de uma bolsa concedida ao abrigo do Protocolo de Cooperação entre a Universidade de Aveiro (UA) e a Universidade Pedagógica de Moçambique (UPM), tendo como um dos objectivos principais a elevação do nível científico dos docentes da UPM.

Com esta investigação pretendeu-se caracterizar as ocorrências de minerais pesados exploradas em Moma (Moçambique) pela companhia mineira Kenmare Resources PLC, conhecer as diferentes fases envolvidas na exploração destes depósitos e analisar a sua composição mineralógica recorrendo a técnicas de separação magnética, gravimétrica, difracção de Raios X e microscopia electrónica de varrimento.

Nesta nota introdutória, faz-se uma breve referência à importância do sector de minerais pesados na economia de Moçambique, enunciam-se os principais objectivos da tese e descrevem-se metodologias aplicadas durante a execução do trabalho.

I.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os depósitos de dunas e paleo-dunas contendo minerais pesados em concentrações económicas estão amplamente representados ao longo de toda a linha de costa da África Subsaariana e constituem as principais reservatórios mundiais de titânio e de zircónio. Cerca de 75% da produção mundial de titânio provém deste tipo de jazidas e apenas 25% é assegurada a partir da exploração de rocha no Canadá e na Noruega (Tyler & Minnitt, 2004).

Na indústria de minerais pesados, a ilmenite (TiFeO_3) é o mais importante produto de exploração, enquanto o zircão (ZrSiO_4) e o rútilo (TiO_2) são extraídos como co-produtos e o ferro-gusa e a monazite como sub-produtos. Devido ao seu carácter quimicamente inerte e à sua resistência, o titânio tem grande aplicação na indústria aeroespacial e em medicina, embora 95% do fornecimento global seja para a produção de pigmentos para tintas, papel e plástico. O zircão é usado essencialmente na indústria cerâmica e, em menor extensão, em areias de fundição, monitores de televisão ou como fonte de zircónio para a indústria química.

Moçambique é um dos países onde a actividade extractiva de minerais pesados tem tido maior desenvolvimento. Os depósitos distribuem-se ao longo da sua linha de costa, sendo de destacar os seguintes, de sul para norte: Ponta do Ouro, Marracuene, Limpopo, Zavora, Gorai, Zalal, Micaúne-Deia, Melai, Xai-Xai, Quissico, Jangamo, Inhassoro, Zalala, Pebane, Moebase, Moma, Angoche, Congolene e Quinga. A estes, juntam-se ainda os placers marinhos da plataforma continental, localizados ao largo da foz do rio Zambeze. Correspondem a depósitos costeiros, actualmente submersos devido a fenómenos eustáticos, isostáticos e/ou outros movimentos tectónicos (Pacheco, 1962, Beiersdorf *et al.*, 1980). Segundo Afonso & Marques (1998), as jazidas de melhor qualidade encontram-se em Zalala, Pebane, Moebase, Moma, Angoche, Congolene e Quinga.

O notável potencial geológico do país, os baixos custos da mão de obra e da energia eléctrica e a proximidade geográfica entre as áreas produtoras e os portos marítimos através dos quais se faz o transporte dos produtos acabados para comercialização no exterior são os factores que mais têm contribuído para a dinamização do sector.

O estudo realizado no âmbito da presente dissertação incidiu sobre as areias ilmeníticas de Moma, na Província de Nampula, que representam uma das maiores jazidas de titânio do planeta, com reservas estimadas de aproximadamente 25 milhões de toneladas de ilmenite, 1,7 milhões de toneladas de zircão e 0,51 milhões de toneladas de rútilo (Kenmare Resources, 2012). A mina foi concessionada à companhia irlandesa Kenmare Resources PLC, que iniciou a produção de concentrados em minerais pesados (ilmenite + zircão + rútilo) em 2007, tendo atingido uma produção anual de 842.900 toneladas em 2011, grande parte da qual para exportação (730.400 toneladas). A empresa tem em curso um projecto de expansão que visa aumentar a sua capacidade de produção para 1,2 milhões de toneladas por ano, prevendo-se que venha a contribuir com 2,4% para o Produto Interno Bruto (PIB) de Moçambique.

I.2 OBJECTIVOS DO TRABALHO

Apesar de existirem trabalhos publicados sobre as ocorrências de minerais pesados em Moçambique, particularmente sobre as areias de Moebase e sobre os depósitos situados nas áreas de licença da Empresa Rio Tinto, a sul de Moçambique, ainda são escassos os estudos detalhados sobre a mineralogia destas jazidas.

Tendo em conta que a caracterização deste tipo de recursos naturais requer um conhecimento aprofundado da geologia da região em que se inserem e uma análise

criteriosa das suas composições mineralógicas, definiram-se os seguintes objectivos principais para a presente investigação:

1. Obter informação sobre a geologia da área em que ocorre a jazida de Moma e enquadrar essa informação no contexto da evolução geodinâmica das principais unidades geológicas expostas no território moçambicano;
2. Conhecer as diferentes fases envolvidas no processo de exploração e tratamento dos minerais pesados em Moma;
3. Realizar estudos mineralógicos em concentrados de minerais pesados, por forma a identificar as principais paragéneses minerais presentes e a descrever as suas características morfológicas e composicionais;
4. Interpretar os dados obtidos.

I.3 METODOLOGIA DO TRABALHO

As actividades desenvolvidas durante o período de preparação da tese incluíram as seguintes etapas fundamentais:

1. Pesquisa bibliográfica. A pesquisa bibliográfica envolveu, numa fase inicial, a consulta de mapas geológicos e de inúmeras publicações para recolha de toda a informação disponível sobre a geologia da região em estudo e, numa fase posterior, para aprofundamento de conhecimentos sobre alguns dos temas abordados;
2. Estágio de duas semanas na companhia mineira Kenmare Resources PLC que compreendeu: (a) a familiarização com as diferentes etapas de exploração e tratamento de minerais pesados, (b) a obtenção de amostras e (c) registo fotográfico;
3. Estudo mineralógico das amostras de minerais pesados, recorrendo a técnicas de separação magnética, gravimétrica, difracção de Raios X e microscopia electrónica de varrimento;
4. Tratamento e interpretação dos dados obtidos e a elaboração de mapas geológicos síntese usando o suporte informático “ARCGIS” versão 10.1 (ESRITM).
5. Redacção do documento final (Dissertação/Tese).

Grande parte do trabalho laboratorial foi efectuado no Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro. No entanto, a investigação realizada contou ainda com o apoio inestimável dos laboratórios da empresa Kenmare Resources e do

laboratório de Microscopia Electrónica de Varrimento do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro (UA), a quem o autor agradece a colaboração prestada.

I.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Além deste capítulo introdutório e das referências bibliográficas, este trabalho inclui mais cinco capítulos organizados da seguinte forma:

- **Capítulo II – Enquadramento Geológico**

Este capítulo inclui duas partes. Na primeira é feito um enquadramento geológico geral da área estudada com base na bibliografia existente e apresenta-se uma síntese das características estratigráficas, tectónicas, metamórficas e magmáticas das grandes unidades geológicas que consituem o território moçambicano. Na segunda, descreve-se, em termos gerais, a geologia da região de Moma.

- **Capítulo III – A jazida de Moma**

O capítulo III incide sobre as diferentes fases do processo de extracção e tratamento de minerais pesados usado na exploração das areias ilmeníticas da jazida de Moma.

- **Capítulo IV – Materiais e Métodos**

Neste capítulo apresentam-se as várias técnicas e procedimentos analíticos aplicados, assim como os materiais utilizados nesta investigação.

- **Capítulo V – Resultados e conclusões**

No capítulo V compilam-se as análises químicas e mineralógicas obtidas em concentrados minerais de quatro amostras da jazida de Moma e interpretam-se os resultados. Por fim, apresentam-se as principais conclusões do trabalho realizado.

- **Referências Bibliográficas**

CAPÍTULO II:
ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

CAPÍTULO II: ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

Neste capítulo descrevem-se sumariamente as principais características litoestratigráficas, tectono-metamórficas e magmáticas das grandes unidades que constituem o território moçambicano, dando ênfase aos aspectos de interesse para o tema em investigação.

II.1 GRANDES UNIDADES TECTONO-ESTRATIGRÁFICAS DE MOÇAMBIQUE

A evolução geológica da África Austral está relacionada com os sucessivos eventos de amalgamação e fragmentação de blocos crustais que ocorreram desde o Precâmbrico ao presente, o que levou a agrupar os terrenos que a compõem em grandes unidades com base na idade do último evento orogénico que os afectou (Fig. II.1):

- (a) cratões arcaicos;
- (b) cinturões móveis pré-grenvillianos;
- (c) cinturões móveis grenvillianos;
- (d) cinturões móveis pan-africanos;
- (e) cinturões móveis grenvillianos com sobreposição da orogenia pan-africana;
- (f) depósitos de cobertura, em que se incluem as formações do Fanerozóico.

Os efeitos das orogenias precâmblicas mais antigas (ca. 3600-2500 Ma) estão bem preservados nos terrenos de idade arcaica que constituem os cratões e os cinturões móveis pré-grenvillianos (Fig. II.1). Estes terrenos, constituídos essencialmente por associações do tipo “greenstone”-granito marcam o mais importante período de crescimento crustal na história da Terra.

Nos cinturões móveis grenvillianos estão registados os processos de acreção continental que deram origem ao supercontinente Rodinia há aproximadamente 1200-1000 Ma (Hoffman, 1992; Jacobs *et al.*, 1993; Grantham *et al.*, 1997; Wareham *et al.*, 1998). À fragmentação deste supercontinente (\approx 700 Ma) sucedeu-se o ciclo orogénico Pan-Africano (Moore, 1991; Hoffman, 1991).

Os cinturões móveis pan-africanos (ca. 500 Ma) formaram-se durante amalgamação do continente Gondwana por justaposição de blocos crustais Meso- e Neoproterozóicos e representam o último evento colisional que afectou a África Austral (Fig. II.1). No sector NE de Moçambique, este evento orogénico foi responsável pelo desenvolvimento de uma extensa cadeia de montanhas, conhecida na literatura por

“Cinturão de Moçambique” (Holmes, 1951), que corresponde a uma das regiões onde o registo dos processos de colisão entre a Gondwana Este e Oeste está mais bem conservado (Hanson, 2003; Thomas *et al.*, 2010).

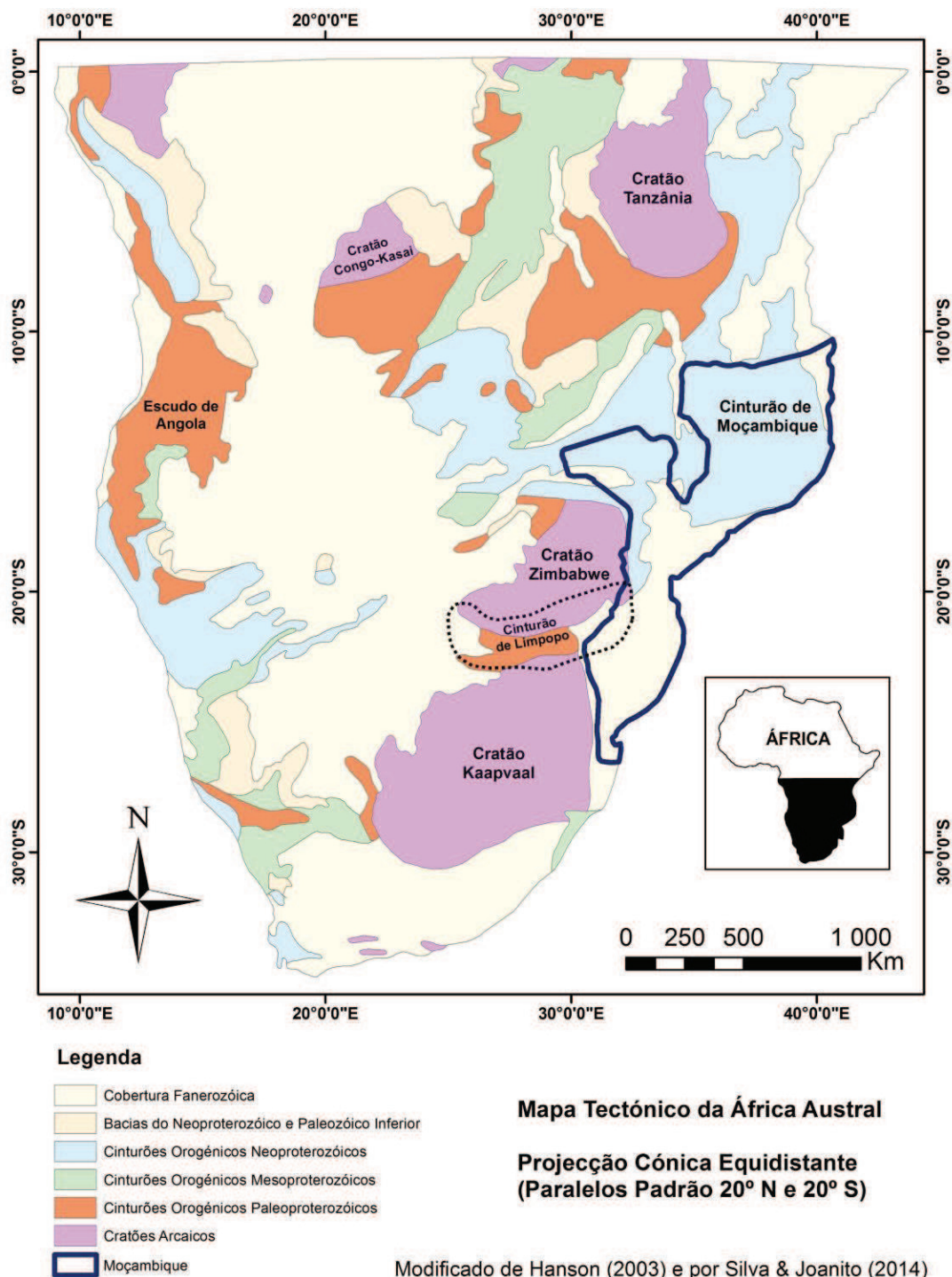


Figura II.1: Mapa simplificado da África Austral, mostrando a distribuição dos principais cratões e cinturões móveis (adaptado de Hanson, 2003)

Devido à intensidade da deformação e do metamorfismo regional associados à orogenia Pan-Africana, as evidências da colisão Grenvilliana não são facilmente reconhecíveis no cinturão de Moçambique, havendo casos em que se torna quase impossível discriminar os efeitos tectónicos e metamórficos dos dois eventos colisionais (Thomas *et al.*, 2010). Como a área estudada está inserida na bordadura do cinturão de Moçambique, descrever-se-á com maior detalhe este sector do território moçambicano.

II.2 O CINTURÃO MÓVEL DE MOÇAMBIQUE

O Cinturão de Moçambique, presentemente conhecido como orógeno Este Africano (EAO) corresponde a uma faixa móvel formada no Neoproterozóico, como resultado da colisão entre a Gondwana Este e Oeste (Fig. II.2). A cadeia estende-se ao longo da actual margem oriental do continente africano e envolveu o retrabalhamento de rochas do soco mesoproterozóico e de sequências supracrustais neoproterozóicas (Hanson, 2003).

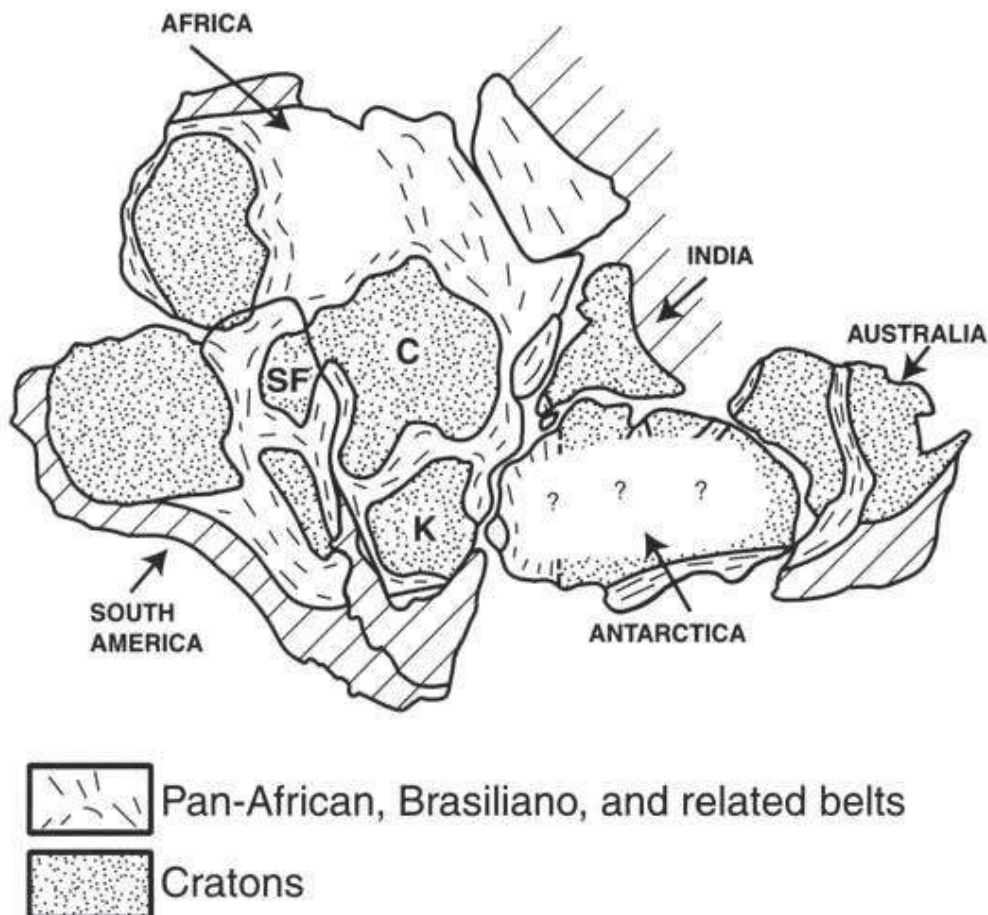


Figura II.2: Reconstrução da Gondwana no final do Neoproterozóico (extraído de Hoffman, 1991, Fitzsimons, 2000 e Hanson, 2003). C - cratão do Congo; K - cratão do Kalahari (cratões de Kaapvaal, Zimbabwe e Grunehogna + blocos Paleoproterozóicos); SF – cratão de São Francisco.

De acordo com trabalhos recentes, os materiais presentes no Cinturão de Moçambique podem ser agrupados nas seguintes unidades principais (Fig. II.3): (1) bloco crustal mesoproterozóico de Nampula; (2) sequências sedimentares supracrustais neoproterozoicas (Complexo de Cabo Delgado e rochas granulíticas de Ocua, Mugeba e Monapo); (3) terrenos alóctones (grupos Mucubúri e Alto Benfica) (4) granitóides sin- e post-tectónicos de idade cambro-ordovícica, integrados nas sequências Murrupula e Malema e (5) depósitos de cobertura (e.g. Macey *et al.*, 2007; 2010; Grantham *et al.*, 2007; Thomas *et al.*, 2010).

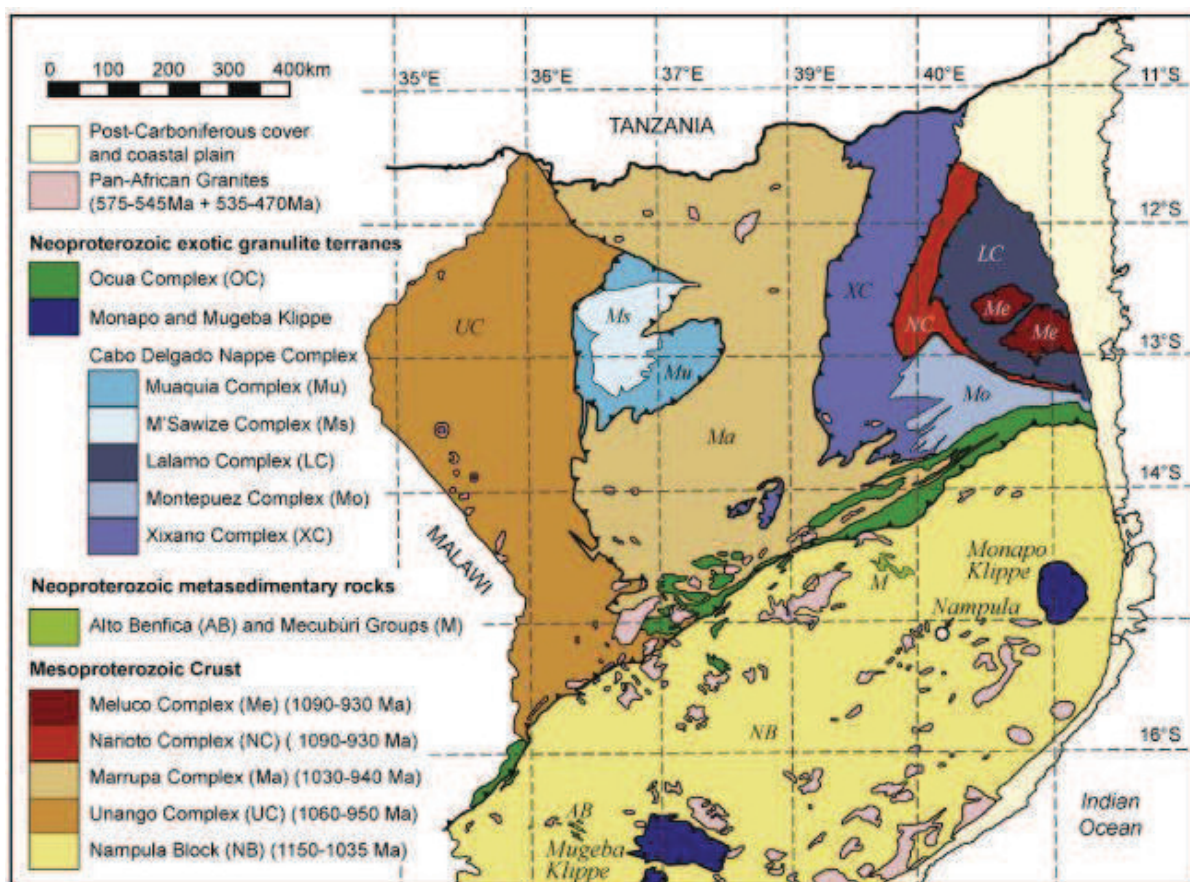


Figura II.2.3: Mapa geológico simplificado do Nordeste de Moçambique mostrando as principais unidades litoestratigráficas em que é subdividido (extraído de Norconsult Consortium, 2007, Macey *et al.*, 2007, Grantham *et al.*, 2007).

II.2.1 O COMPLEXO DE NAMPULA

O complexo de Nampula, com uma área de aproximadamente 100000 km², corresponde ao mais extenso bloco crustal mesoproterozóico representado no norte de Moçambique (Fig. II.3). É limitado a norte pelos blocos mesoproterozóicos de Unango e Marrupa através de uma importante zona de cisalhamento com orientação ENE – WSW, designada por cinturão de Lúrio.

As rochas mais antigas do complexo de Nampula (sequência de **Mocuba**) constituem uma associação metamórfica da fácies anfibolítica compreendendo gnaisses cinzentos bandados migmatizados, rochas metaplutónicas com afinidades TTG (tonalito-trondjemito-granodiorito) e ortognaisses graníticos (Macey *et al.*, 2010). As idades U-Pb obtidas por Macey *et al.* (2010) em zircões de um gnaisse bandado permitiram datar a cristalização dos seus protólitos com 1127 ± 9 Ma, enquanto os valores encontrados nos bordos de um dos grãos de zircão (ca. 1090 Ma) foram interpretados pelos mesmos autores como sobrecrecimentos associados à intrusão mais tardia do ortognaisse tonalítico de Rapale, que forneceu idades de 1095 ± 19 e 1091 ± 14 Ma (Macey *et al.*, 2010). Segundo estes autores, a sequência de Mocuba apresenta características geoquímicas tipicamente calco-alcalinas sugerindo que as rochas que a compoem derivaram de magmas juvenis gerados num ambiente de arco insular.

Em estreita associação com os gnaisses de Mocuba, ocorrem extensas faixas metamórficas de rochas supracrustais, compostas por metassedimentos de natureza variada (metapelitos / metapsamitos / calco-silicatadas) e metavulcanitos básicos e ácidos, incluídos no chamado Grupo **Molocué**. Com base nas datações U-Pb obtidas em duas amostras do gnaisse leucocrático de Mamala intercalado no grupo Molocué (metavulcanito ácido?) foi possível constranger a idade deste episódio vulcânico ao intervalo 1092 ± 13 - 1090 ± 22 Ma (Macey *et al.*, 2010). Por outro lado, as idades U-Pb de zircões detríticos presentes numa amostra de um paragneisse calco-silicatado mostram uma distribuição bimodal (ca. 1100 e 1800 Ma), o que aponta para a contribuição de áreas fonte de idades mesoproterozóica (sequência de Mocuba) a paleoproterozóica para estes sedimentos (Macey *et al.*, 2010).

A fase final da actividade ígnea Mesoproterozóica está representada por abundantes plutões e corpos intrusivos tabulares de granitos porfiróides foliados, gnaisses ocelados e ortognaisses graníticos com idades variando entre 1087 ± 16 Ma a 1057 ± 9 Ma, agrupados na sequência **Culicui** (Bingen *et al.*, 2009, Macey *et al.*, 2010). No seu conjunto, os termos desta sequência apresentam assinaturas geoquímicas semelhantes às dos granitóides de tipo A, pelo que têm sido interpretados como intrusões tardi-tectónicas Grenvillianas formadas num contexto extensional.

Durante a orogenia Este Africana no final do Neoproterozóico, as rochas do Complexo de Nampula foram intensamente afectadas por deformação e metamorfismo regional em condições da fácies anfibolítica, explicando assim que as idades U-Pb obtidas em bordos de zircões ou a partir das intersecções inferiores das discórdias sejam

significativamente mais jovens (ca. 550 a 500 Ma) (Bingen *et al.*, 2009, Macey *et al.*, 2010).

II.2.2 TERRENOS EXÓTICOS ALÓCTONES NEOPROTEROZÓICOS

Sobre o substrato mesoproterozóico do Complexo de Nampula, assentam em contacto tectónico várias unidades alóctones de rochas granulíticas (“nappes” e “klippen”). No sector norte, estes terrenos constituem o Complexo de Mantos de Cabo Delgado, enquanto no domínio sul formam os Complexos de Ocua, Mugeba e Monapo (Fig. II.3).

De acordo com a bibliografia publicada, o evento metamórfico granulítico registado nas rochas destes complexos ocorreu entre os 735 Ma e os 550 Ma, com picos aos 640 Ma e aos 590 Ma (Kröner *et al.*, 1997, Norconsult, 2007, Grantham *et al.*, 2007, Macey *et al.*, 2007, 2010; Bingen *et al.*, 2009; Boyd *et al.*, 2010; Macey *et al.*, 2013), em condições de pressão e temperatura variando entre 700–800°C a 7–8,5 kbar e 910 ± 20°C a 9–11,5 kbar (Roberts *et al.*, 2005; Jamal, 2005; Engvik *et al.*, 2007; Macey *et al.*, 2013).

O “klippe” de **Mugeba** é composto por gneisses charnoquíticos, granulitos máficos e paragnaisses granulíticos, enquanto o de **Monapo** apresenta uma maior diversidade de litologias, compreendendo granulitos máficos e félsicos e paragnaisses granulíticos com um “fabric” tectónico muito penetrativo, rochas ultramáficas, máficas e félsicas alcalinas sem grandes evidências de deformação e granitos com feldspato alcalino e sienitos hornblêndicos pouco deformados (Macey *et al.*, 2007, Macey *et al.*, 2013).

II.2.3 SEQUÊNCIAS SUPRACRUSTAIS NEOPROTEROZÓICAS

Para além dos “klippen” alóctones de Monapo e Mugeba, sobre os gnaisses mesoproterozóicos de bloco de Nampula assentam em discordância duas formações metassedimentares de idade neoproterozóica: a formação de Mecubúri e a formação do Alto Benfica (Fig. II.3).

O grupo **Mecubúri**, com uma área de exposição de cerca de 500 km², ocorre ao longo de uma faixa alongada com orientação NW-SE e é composto por: (1) paragnaisses biotíticos com clastos dispersos, possivelmente derivados de protólitos sedimentares psamíticos, (2) metaconglomerados grosseiros, suportados por clastos e (3) gnaisses arenosos com intercalações calco-silicatadas (Thomas *et al.*, 2010).

No grupo do **Alto Benfica** inclui-se um conjunto metassedimentar, constituído por quartzitos e metaconglomerados, que afloram sob a forma de uma série de estreitas

lenticulas isoladas, cerca de 350 km a SW de Mecubúri. A presença de conglomerados grosseiros e de psamitos feldspáticos em ambas as formações é concordante com um ambiente de deposição proximal, provavelmente continental fluvial em pequenas bacias intramontanhas (Thomas *et al.*, 2010).

Os dados geocronológicos obtidos por Thomas *et al.* (2010) em zircões detríticos da sequência Mecubúri indicam que estes depósitos têm uma idade máxima de 530 ± 18 Ma e se formaram a partir da erosão de rochas com idades compreendidas ~1100–950 Ma, 750–800 Ma e 700–530 Ma, sendo possível que tenham derivado, em parte, dos gnaisses de Nampula (ca. 1100 Ma), com uma contribuição menor de componentes do Neoproterozóico inferior e médio (950–700 Ma) e uma abundante participação de material do Neoproterozóico superior exposto nos terrenos situados a norte do cinturão de Lurio (650–550 Ma).

Já no caso da sucessão sedimentar do Alto Benfica, a idade máxima de deposição é de 948 ± 32 Ma (Thomas *et al.*, 2010). A distribuição de idades registada nos zircões destes sedimentos aponta para um importante envolvimento de fontes próximas (Complexo de Nampula, ca. 1100 Ma) e de rochas mais antigas (1200–1400 Ma, 1600–2000 Ma), sem grande influência de reservatórios de idade neoproterozóica (Thomas *et al.*, 2010).

II.2.4 GRANITÓIDES NEOPROTEROZÓICOS

Nos estádios finais da orogenia Este Africana, o Complexo de Nampula foi intruído por abundantes volumes de granitóides alcalinos tardi- e pós-tectónicos, representados pelas Sequências Murrupula e Malema (Fig. II.3).

A sequência **Murrupula** é constituída por granitos porfiróides grosseiros, granitos não porfiróides de grão médio a fino e raros monzodioritos e sienitos, com idades variando entre ca. 530 – 495 Ma (Macey *et al.*, 2007; Grantham *et al.*, 2007, 2008; Jacobs *et al.*, 2008a-b).

Com idades de intrusão semelhantes, a sequência de **Malema** inclui numerosos plutões sub-circulares de granitos alcalinos, monzonitos e charnoquitos que se instalaram ao longo e na vizinhança do cinturão de Lúrio (Bingen *et al.*, 2009).

II.2.5 COBERTURA FANEROZÓICA

No final do ciclo Pan-Africano (Neoproterozóico – Câmbrio), a actividade orogénica cessou e o substrato meso-neoproterozóico do sector nordeste de

Moçambique sofreu uma trajectória de arrefecimento durante a transição para o regime predominantemente distensivo que iria prevalecer durante a sua evolução subsequente.

Segundo Emmel *et al.* (2011), o arrefecimento das rochas do substrato ocorreu essencialmente como resposta ao processo de fragmentação da Gondwana sul, que se iniciou no Carbónico Superior - Pérmico levando à individualização de bacias sedimentares com estilos distintos (Fig. II.4).

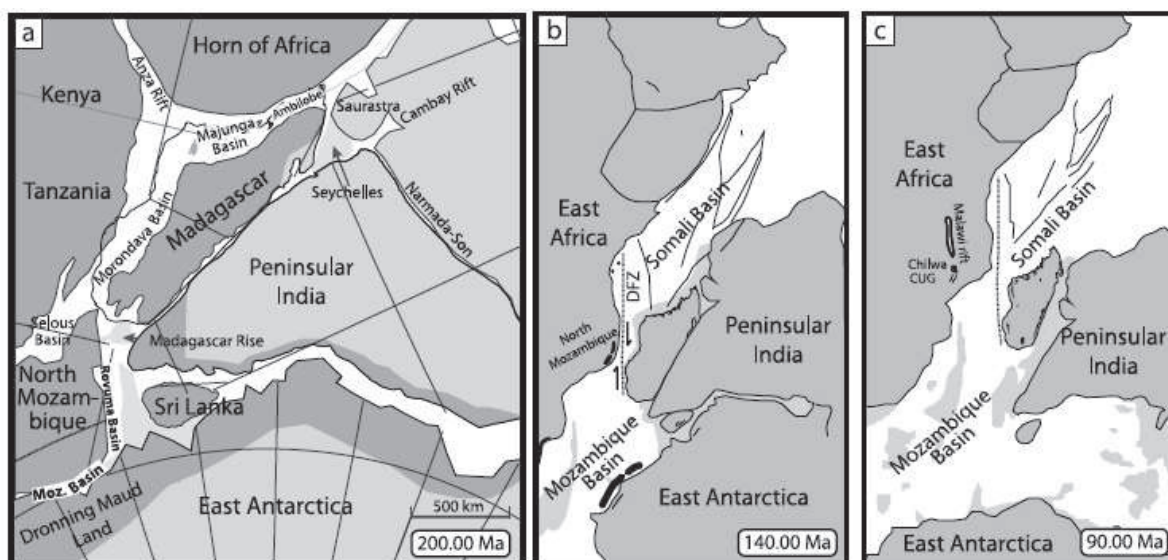


Figura II.4: (a) Gondwana central há cerca de 200 Ma. Os terrenos afectados pela orogenia Pan-Africana estão indicados com cor cinzenta escura. (b-c) Fragmentação da Gondwana aos 140 Ma e 90 Ma, mostrando as rochas vulcânicas do Jurássico e Cretácico a preto. CUG – Graben de Chire-Urema; DFZ – Zona de Fractura Davie; Moz. Basin – Bacia de Moçambique (extraído de Emmel *et al.*, 2011).

Em Moçambique, a fase inicial de “rifting” está registada nos sedimentos do **Superggrupo Karoo** (300 – 180 Ma) que se acumularam no **graben de Maniamba / Metangula** (Província de Niassa) entre o Carbónico Superior e o Jurássico Inferior, culminando com o vulcanismo da Grande Província Ígnea do Karoo, com o seu pico ao redor dos 183 Ma (Manninen *et al.*, 2008; Emmel *et al.*, 2011).

No mesmo período, desenvolveram-se várias bacias no território moçambicano, sendo as mais importantes: a bacia do Rovuma, localizada ao longo da fronteira norte entre Moçambique e a Tanzânia e a bacia de Moçambique, na costa sul do país (Fig. II.4). Embora os dados sísmicos sugiram que os depósitos do Permo-Triásico e do Jurássico Inferior-Médio estão representados no “off-shore” das bacias do Rovuma e Moçambique, a sua ocorrência na parte emersa da sequência é desconhecida (Salman e Abdula, 1995).

A estratigrafia da **bacia do Rovuma** foi estudada em detalhe por Key *et al.* (2008) e Smelror *et al.* (2008) que subdividiram a sucessão sedimentar em cinco megasequências, reflectindo os diferentes estádios de fragmentação do continente Gondwana: (a) pré-rift durante o Permo-Triásico, (b) sin-rift entre o Triásico e o Jurássico Inferior, (c) deriva inicial no Jurássico Médio – Cretácico Médio, (d) deriva tardia no Cretácico Médio - Oligocénico e (e) progradação deltaica desde o Oligocénico ao presente.

As rochas sedimentares mais antigas expostas no “on-shore” integram-se na Formação de Pemba (Jurássico Superior – Cretácico Inferior), que é constituída essencialmente por arenitos continentais e argilo-siltitos marinhos com belemnites, bivalves e amonites (Norconsult Consortium, 2007; Key *et al.*, 2008; Smelror *et al.*, 2008). Com uma idade imprecisa, possivelmente idêntica à do conjunto inferior da Formação de Pemba, encontram-se ainda as espessas sucessões siliciclásticas continentais das Formações de Rio Mecole e N’Gapa (Key *et al.*, 2008; Smelror *et al.*, 2008).

Sobre a Formação de Pemba assentam os conglomerados e arenitos da Formação de Macomia (Aptiano-Albiano), aos quais se seguem os arenitos carbonatados e margas bioturbadas da Formação de Mifume (Albiano/Campaniano-Maastrichtiano) e, já no Cenozóico, os conglomerados, arenitos, argilitos e calcários recifais das Formações de Alto Jingone (Paleocénico-Eocénico), Quissanga (Eocénico médio-Oligocénico), Chinda (Neogénico) e Mikindani (Neogénico).

Na **bacia de Moçambique**, o registo estratigráfico inicia-se com rochas vulcânicas do Jurássico Médio e camadas vermelhas do Jurássico Superior (Salman and Abdula, 1995), evoluindo a partir do Cretácico Inferior para uma sedimentação típica de margem passiva, compreendendo depósitos siliciclásticos de ambiente marinho profundo a deltaico e material carbonáceo (Salman e Abdula, 1995; Emmel *et al.*, 2011). Esta sequência está bem preservada no delta do Zambeze, onde chega a atingir uma espessura máxima de ~11 km, com picos de influxo de sedimentos no Cretácico Superior (90–65 Ma), Oligocénico (34–24 Ma) e Miocénico Superior (10 Ma) (Emmel *et al.*, 2011).

II.3 A REGIÃO DE MOMA

Do ponto de vista geológico, a região onde está situada a jazida de Moma (16°30’S, 39°40’E) insere-se em terrenos de cobertura de idade Quaternária (Pleistocénico-Holocénico) que se dispõem segundo uma faixa alongada ao longo da linha de costa (Fig. II.5). Estes terrenos são limitados a oeste por um estreito cinturão de rochas vulcânicas jurássicas do Grupo de Angoche.

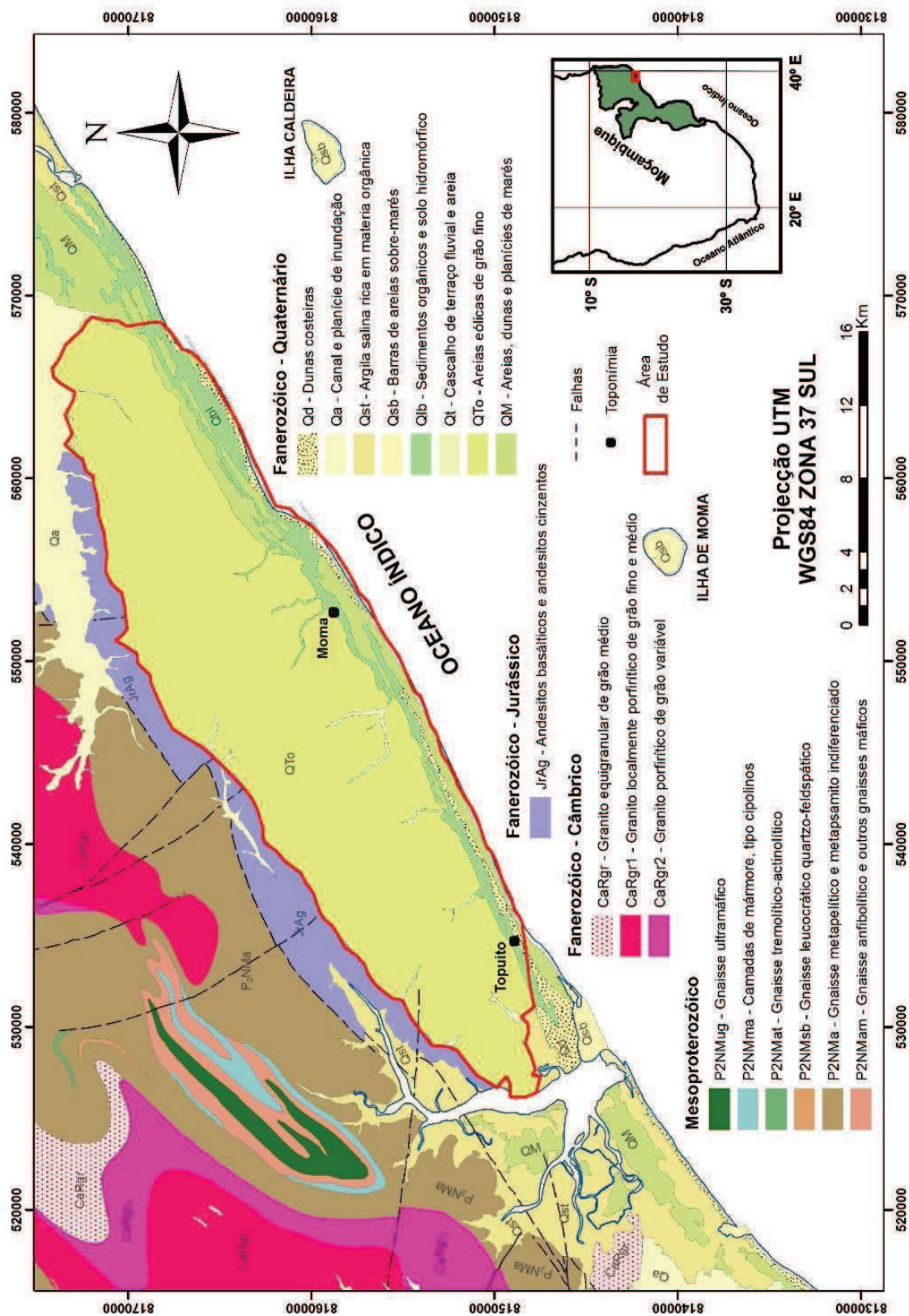


Figura II.5: Mapa geológico simplificado da região de Moma

Os vulcanitos do grupo Angoche foram descritos por Grantham *et al.* (2004; 2005) como andesitos calco-alcalinios de ambiente colisional com cerca de 180-190 Ma (Fig. II.5). Avançando para o interior, encontra-se o substrato mesoproterozóico do Complexo de Nampula assim como várias intrusões de granitóides neoproterozóicos da sequência Murrupula (Fig. II.5).

A orla costeira de Moma, com uma largura de cerca de 15 km, é composta essencialmente por dunas arenosas que emergem até mais de 100 m acima do nível médio das águas do mar (NMM) e estão fortemente dissecadas pelos estuários dos rios principais. Em termos geomorfológicos, é possível agrupá-las nas seguintes unidades, consoante se progride de oeste para este (Fig. II.6):

- (1) *Dunas Altas de Topuito e Tebani*, com uma elevação média de 100 m em relação ao NMM;
- (2) *Planícies de Namalope* (baixios), apresentando uma topografia relativamente plana e uniforme (elevação média entre +12m a +15m NMM) e uma área de aproximadamente 32 km² junto às Dunas Altas;

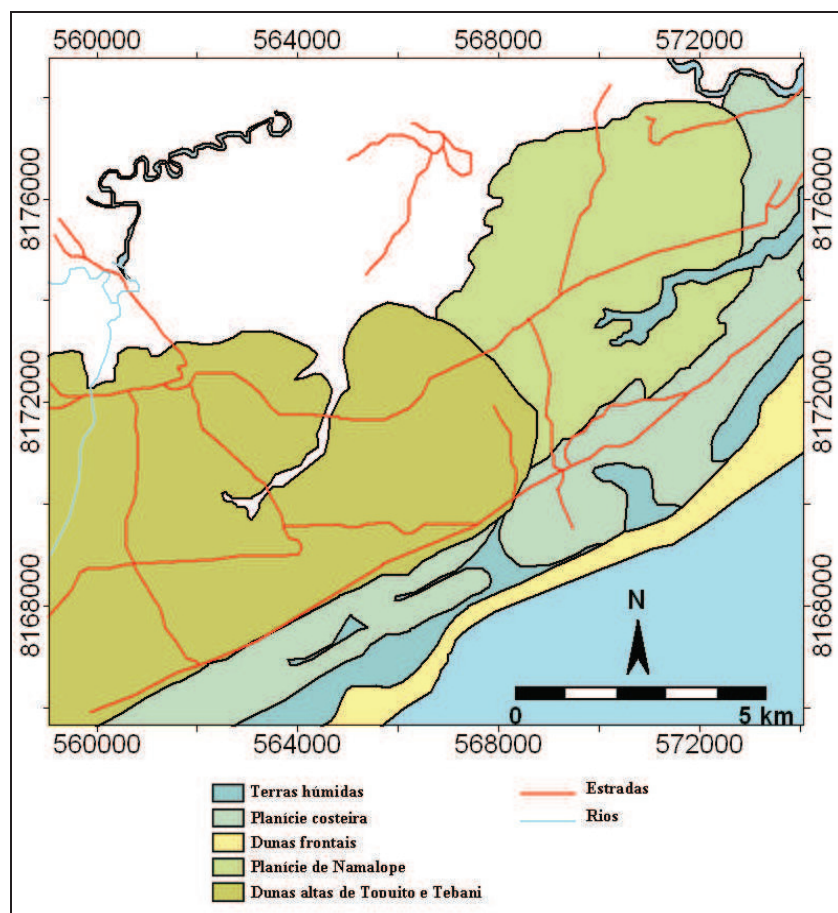


Figura II.6: Distribuição das diferentes unidades morfológicas na orla costeira de Moma

(3) *Planícies costeiras e estuarinas* correspondendo a áreas planas (elevação média de +6 m NMM) que envolvem as Planícies de Namalope e as Dunas Altas a norte, este e oeste;

(4) *Dunas frontais*, constituídas por areias eólicas dispostas segundo uma faixa com 500 m de largura e uma elevação máxima de 20 m em relação ao NMM, paralela à linha da costa.

Estratigraficamente, as cadeias de Dunas Altas de Topuito e Tebani são compostas por um manto de areias recentes limpas, de grão fino a médio com elevados conteúdos em minerais pesados (Unidade 1) recobrindo os depósitos de dunas vermelhas antigas do Pleistocénico (Unidades 2-3-4; Fig. II.7). Na Unidade 2 predominam areias alaranjadas e avermelhadas ligeiramente argilosas, que se tornam progressivamente mais ricas na componente argilosa à medida que se progride para a base da sequência (Unidades 3 e 4) (Fig. II.7).

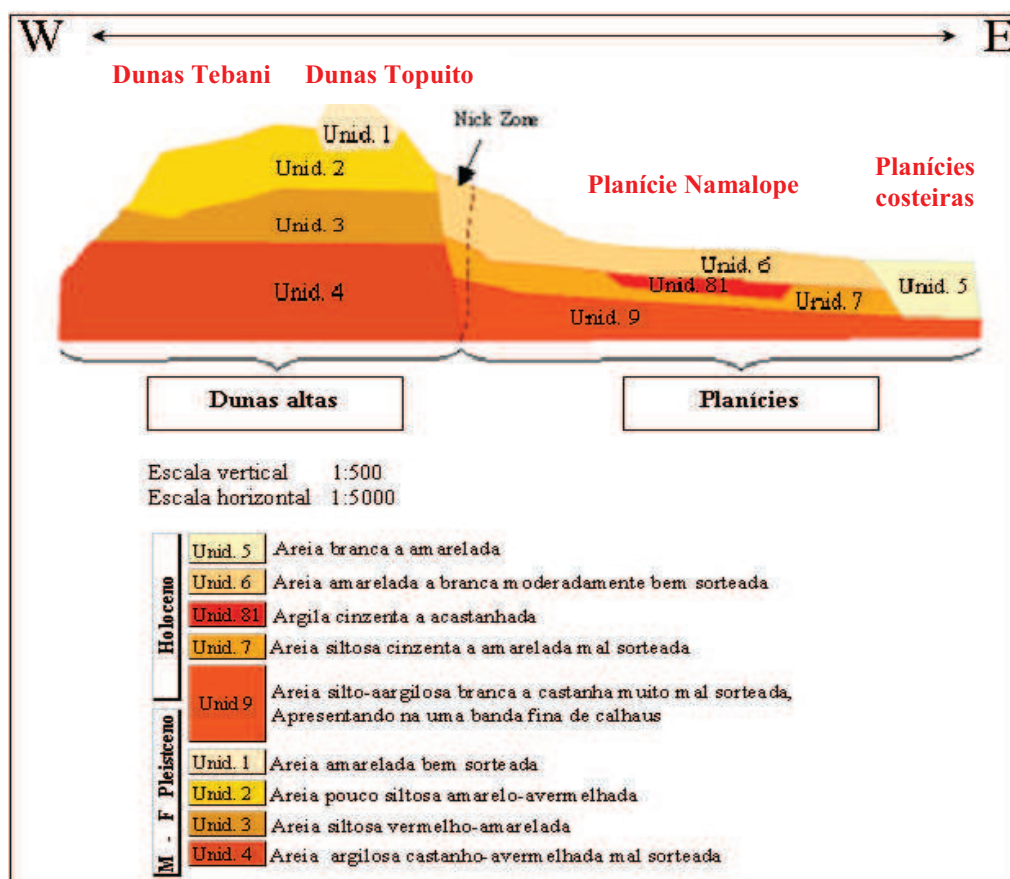


Figura II.7: Esquema simplificado mostrando a distribuição das diferentes unidades estratigráficas presentes nos depósitos quaternários de Moma

Já as Planícies de Namalope estão representadas pelas unidades 6, 81, 7 e 9 de idade Holocénica (Fig. II.7) e incluem um nível de areias brancas a amareladas, razoavelmente bem calibradas (Unidade 6), assentando localmente sobre um horizonte de argilas cinzentas acastanhadas (Unidade 81). Na unidade 7 predominam areias siltosas cinzentas amareladas de grão fino a médio, enquanto a unidade 9 é composta por areias silto-argilosas de cor clara, com intercalações esporádicas de finos leitos de clastos de maiores dimensões.

Por fim, os depósitos das Planícies Costeiras e das Dunas Frontais (Unidade 5) correspondem a um sistema complexo de planícies litorais e de inundação, dunas migratórias e aderentes, constituídos por areias limpas de tonalidade branca amarelada, grão médio a grosseiro, com baixos teores em minerais pesados (Fig. II.7).

CAPÍTULO III:

A JAZIDA DE MOMA

CAPÍTULO III: A JAZIDA DE MOMA

Este capítulo inicia-se com uma breve introdução sobre os diferentes tipos de jazidas de minerais pesados e descrevem-se, em seguida, as principais fases de extracção e tratamento de minerais pesados envolvidas na exploração das areias ilmeníticas da jazida de Moma.

III.1 INTRODUÇÃO

Em Moçambique, os depósitos de minerais pesados com interesse económico (“Economic Heavy Minerals” - EHM) distribuem-se ao longo de toda a costa, estando as principais explorações localizadas em Ponta do Ouro, Marracuene, Limpopo, Zavora, Gorai, Zalal, Micaúne-Deia, Melai, Xai-Xai, Quissico, Jangamo, Inhassoro, Zalala, Pebane, Moebase, Moma, Angoche, Congolene e Quinga. Para além destes depósitos, há ainda a referir os “placers” marinhos associados à foz do rio Zambeze, que estão actualmente submersos devido a fenómenos eustáticos, isostáticos e/ou outros movimentos tectónicos (Pacheco, 1962, Afonso & Marques, 1993, Beiersdorf *et al.*, 1980).

As principais ocorrências de EHM em Moçambique são constituídas por ilmenite, rútilo, zircão e monazite. Embora existam em proporções bastante baixas em rochas ígneas e metamórficas, estes minerais podem ser fortemente concentrados durante o ciclo sedimentar como resultado da sua elevada densidade ($> 2.9 \text{ g/cm}^3$) e grande resistência química e mecânica.

De acordo com Suguiu (1973; 2003), a génese das jazidas de minerais pesados é controlada por vários factores, entre os quais se destacam os seguintes: (a) mineralogia das rochas-fonte; (b) clima; (c) geomorfologia da região e (d) hidrodinâmica dos processos de transporte e deposição. A quantidade de minerais pesados presentes num determinado depósito depende, assim, da sua abundância na área fonte, da intensidade dos fenómenos de meteorização química e física, os quais são muito condicionados pelo clima, e da selecção diferencial dos grãos por densidade e forma durante o transporte e deposição.

Os minerais pesados são removidos da rocha-mãe durante a meteorização e erosão e incorporados, em conjunto com outras fases minerais, na fracção detrítica, que tanto pode permanecer “in-situ”, como ser transportada pelos agentes superficiais (rios,

vento, águas pluviais, gelo e acção da gravidade) até se acumular mecanicamente sob a forma de depósitos de areias e cascalhos (“placers”) de rios, praias, dunas ou até na plataforma continental (Figs. III.1 e III.2). Nas zonas litorais, a acção das ondas e das correntes costeiras promove o arrastamento e dispersão dos minerais mais leves, levando a um enriquecimento relativo em EHM nos depósitos de praia.

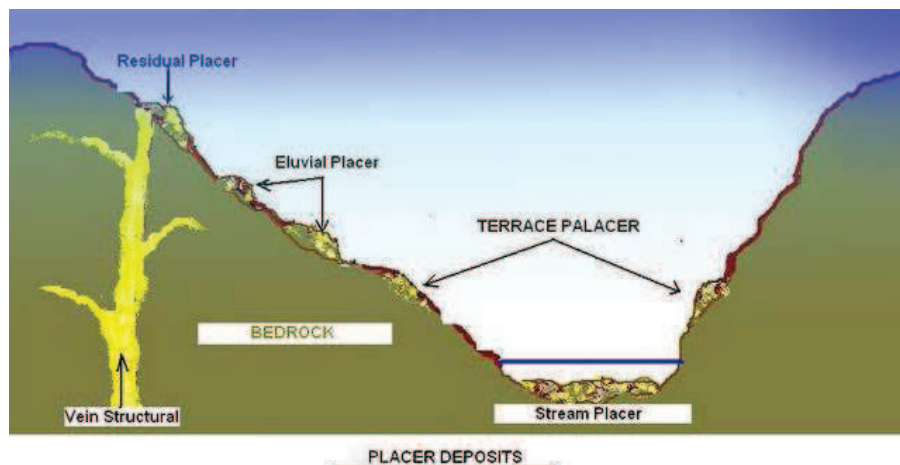


Figura III.1: Diagrama esquemático mostrando a formação de vários tipos de “placers” (extraído de Miners, 2011)

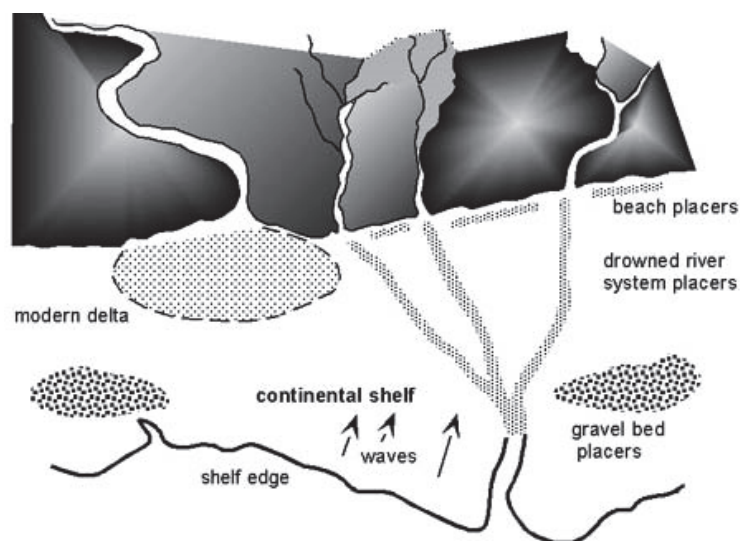


Figura III.2: Diagrama esquemático mostrando a formação de “placers” de praia e marinhos (extraído de http://geology.uprm.edu/Morelock/9_image/placenv.jpg)

Os “placers” marinhos situam-se nas praias actuais ou na plataforma continental (Fig. III.2). A sua génese está intimamente relacionada com os eventos de oscilação do nível do mar que ocorreram no Quaternário, provocando a exposição de grandes áreas da plataforma continental nas fases de descida do nível eustático (regressões marinhas),

e a submersão de extensas porções das planícies costeiras durante os períodos de subida do nível das águas do mar (transgressões marinhas).

A formação dos “placers” eólicos (dunas) está essencialmente ligada ao retrabalhamento dos depósitos de praia pelo vento e também foi influenciada pelas mudanças climáticas que caracterizaram todo o período Quaternário e envolveram a alternância de fases glaciais (desenvolvimento de calotes polares) e interglaciais (degelo).

Em Moçambique, a maioria das jazidas de minerais pesados estão associadas a “placers” de praia ou ao retrabalhamento destes pelo vento (dunas costeiras e dunas interiores) (Afonso & Marques, 1993). Segundo Afonso & Marques (1993), a fonte directa dos minerais pesados acumulados nos “placers” costeiros de Moçambique são as areias de cobertura do Plistocénico Inferior que se depositaram sobre uma superfície de denudação ligeiramente inclinada, que se estende até ao arquipélago do Bazaruto, Província de Inhambane. Os mesmos autores consideram ainda que os sedimentos do Plistocénico Inferior podem ser agrupados em dois conjuntos de acordo com a sua área de proveniência:

- A Norte de Quelimane, onde se localiza o distrito de Moma, os sedimentos de cobertura resultaram maioritariamente do desmantelamento das rochas precâmblicas (meso- e neoproterozóicas) que constituem o cinturão móvel de Moçambique (Fig. II.1) e, em menor proporção, das sequências ígneas e sedimentares do Supergrupo Karoo. Estes sedimentos contêm um elevado conteúdo em EHM, particularmente de ilmenite, rútilo e zircão.
- A Sul de Quelimane, os sedimentos do Plistocénico Inferior provieram da erosão das áreas cratónicas do sul do Zimbabwe e do Kaapvaal (Fig. II.1), como é demonstrado pela presença de andaluzite (a sul do rio Save), silimanite e epídoto (na foz do rio Save) e silimanite e anfíbola (na foz dos rios Pungué e Zambeze) (Cilek, 1981-1982). Na área meridional de Moçambique, nomeadamente ao sul do rio Save, o clima é árido com vertente eólica, favorecendo a formação de dunas altas e a re-concentração de minerais pesados (ilmenite, rútilo e zircão).

Na Tabela III.1, sintetizam-se as principais características dos depósitos de EHM situados na região norte de Moçambique. A informação contida nesta tabela baseia-se em dados fornecidos por Cilek (1981-1982), que poderão não reflectir fielmente a realidade actual. Note-se que a jazida de Moma é classificada neste trabalho como “um depósito pequeno, sem interesse”, embora as reservas estimadas em 2012 sejam de

aproximadamente 25 milhões de toneladas de ilmenite, 1,7 milhões de toneladas de zircão e 0,51 milhões de toneladas de rútilo (Kenmare Resources, 2012).

Tabela III.1 – Características dos principais depósitos de minerais pesados da região Norte de Moçambique (extraído de Afonso & Marques, 1993)

Localização	Tipo de depósito	Extensão ou tonelagem de MP	Teor médio dos MP económicos (%)	Reservas totais de concentrados	Composição mineralógica (%)	Ordem de importância	Observações
Moebase	Praias	23 x 10	10 - 15	Uteis (EHM) em toneladas 2x10	Ilm.-75,4 Rut.-3,3 Zir.-2,7	I	Depósito importante
Moma	Praias	6,24 x 10	6,6	400x10	Ilm.-60 Rut.-2,9 Zir.-2,6	VII	Depósito pequeno sem interesse
Angoche	Dunas interiores	46 x 10	4	1,8x10	Ilm.-82 Rut.-2,6 Zir.-6	III	Deposito promissor Teor bom em zircão
Congolene	Dunas	207 x 10	4,4	9,1x10	Ilm.-81,2 Rut.-2,8 Zir.-5,2	III	Deposito promissor Dunas desenvolvidas Bons acessos
Quinga	Dunas costeiras	2,15 x 106 125 x 103 162 x 10	18 80 7	11,8x10	Ilm.-79,3 Rut.-3,2 Zir.-5,5	III	Deposito promissor Perto de Angoche.

Abreviaturas: Ilm. Ilmenite; Rut.- rútilo; Zir.- zircão. Fonte: Cilek, 1981-1982.

III.2 A JAZIDA DE MOMA

Como foi referido no Capítulo II, a região onde está situada a jazida de Moma insere-se em terrenos de cobertura de idade Quaternária (Pleistocénico-Holocénico) que se dispõem segundo uma faixa alongada ao longo da linha de costa. Em termos geomorfológicos, é possível agrupá-los nas seguintes unidades, consoante se progride de oeste para este (Fig. III.3):

- (1) *Dunas Altas de Topuito e Tebani*, com uma elevação média de 100 m em relação ao nível médio das águas do mar (NMM);
- (2) *Planícies de Namalope* (baixios), apresentando uma topografia relativamente plana e uniforme (elevação média entre +12m a +15m NMM) e uma área de aproximadamente 32 km² junto às Dunas Altas;
- (3) *Planícies costeiras e estuarinas* correspondendo a áreas planas (elevação média de +6 m NMM) que envolvem as Planícies de Namalope e as Dunas Altas a norte, este e oeste;

(4) *Dunas frontais*, constituídas por areias eólicas ocupando uma faixa com 500 m de largura e uma elevação máxima de 20 m em relação ao NMM, paralela à linha da costa.

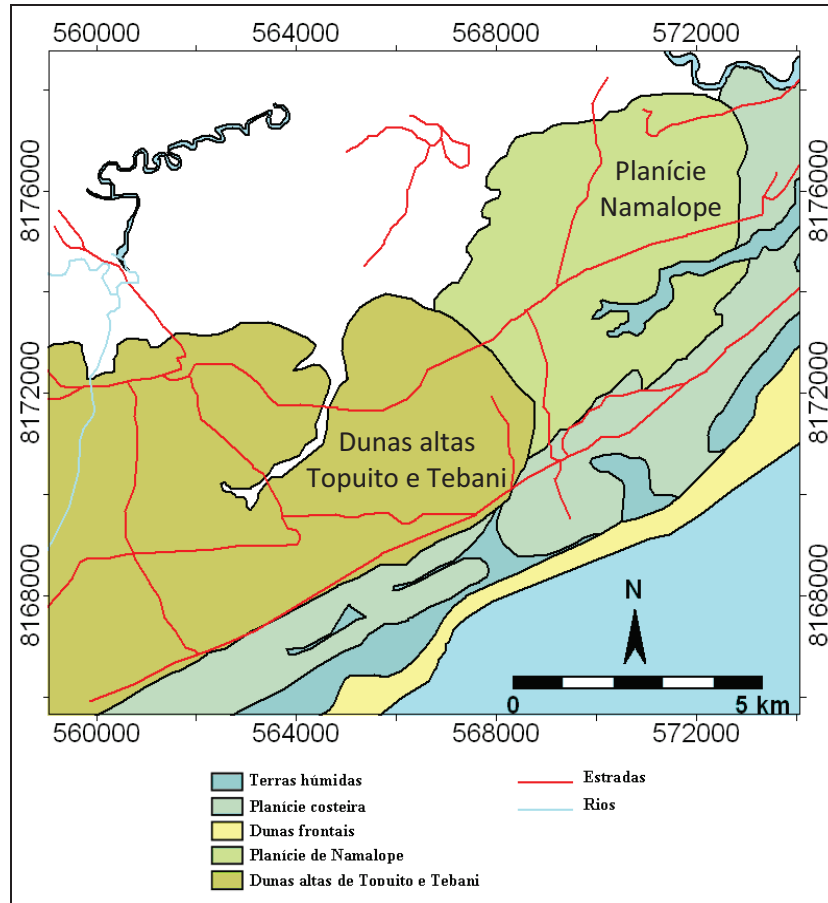


Figura III.3: Distribuição das diferentes unidades morfológicas na orla costeira de Moma

Estratigraficamente, as cadeias de Dunas Altas de Topuito e Tebani são compostas por um manto de areias recentes limpas, de grão fino a médio com elevados conteúdos em minerais pesados recobrendo depósitos de dunas vermelhas antigas do Pleistocénico, também mineralizados (Fig. III.4 e III.5). Foi nestes depósitos que se iniciou a actividade de exploração de EHM no distrito de Moma.

A mineralização, conhecida por “depósito de Nataka”, estende-se desde a superfície até à base da duna e foi identificada pela primeira vez, em meados dos anos 90, através de sondagens realizadas pelas empresas Kenmare Resources PLC e BHP no âmbito de um estudo exploratório regional, com uma malha de 1000 x 500m. Em 2001, a jazida foi concessionada à companhia irlandesa Kenmare Resources PLC, que produziu os primeiros concentrados de minerais pesados (ilmenite + zircão + rútilo) em 2007.



Figura III.4 - Vista parcial das dunas altas vermelhas do interior do depósito de Nataka (Dunas Altas de Topuito e Tebani).



Figura III.5 - Dunas de Topuito



Figura III.6 - Vista parcial da planície de Namalope

A partir de 2007, a empresa alargou a sua actividade para a planície de Namalope (Figs. III.3 e III.6), onde se concentra actualmente o grosso da exploração. No depósito de Namalope, os níveis de areias mais superficiais (unidades 6 e 7) estendem-se até cerca de 10 a 20 m abaixo do presente nível do solo e estão enriquecidos em EHM, mas é nas camadas argilosas subjacentes (unidades 81 e 82), que os conteúdos em minerais pesados são mais elevados (Fig. II.7). A unidade de base (unidade 9), composta por areias silto-argilosas com intercalações de finos leitos de clastos de maiores dimensões é praticamente estéril, marcando o limite inferior do jazigo (Fig. II.7).

III.3 EXPLORAÇÃO MINERAL EM MOMA

Durante o estágio realizado em Agosto de 2013, o autor teve oportunidade de acompanhar as diferentes fases de extracção e concentração de EHM no depósito de Namalope, que se descreverão sumariamente nas secções seguintes. O esquema geral da sequência de operações está esquematicamente representado na Figura III.7.

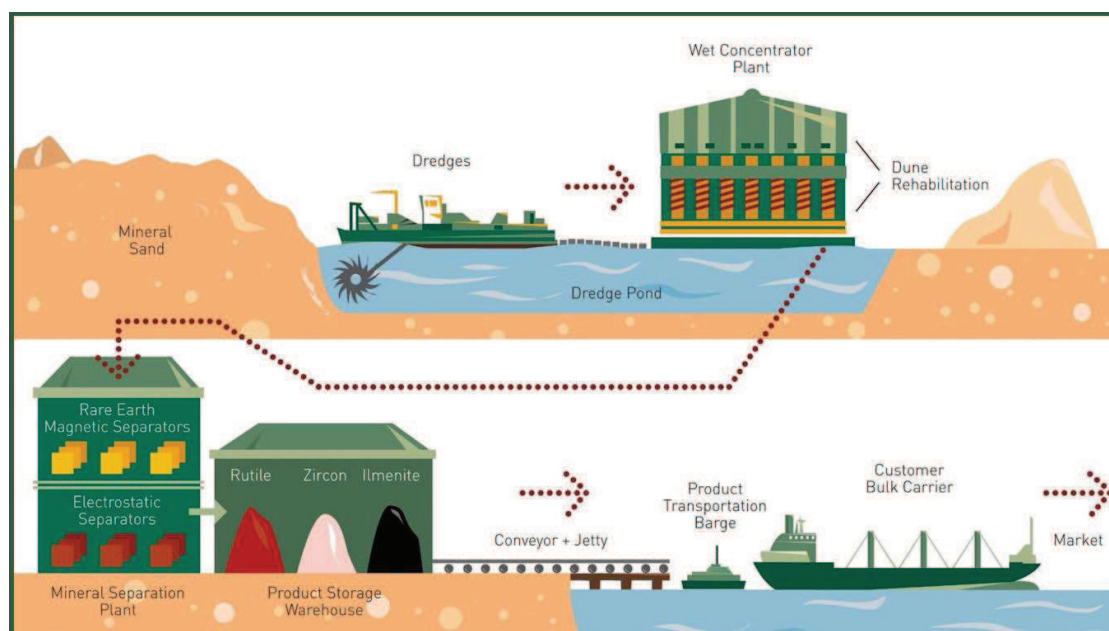


Figura III.7: Diagrama esquemático mostrando a sequência de operações envolvida na exploração do depósito de Namalope (extraído de <http://www.kenmareresources.com/operations/summary-of-operations.aspx>).

III.3.1 EXTRACÇÃO DE AREIAS PESADAS

No depósito de Moma, a extracção das areias pesadas é feita essencialmente por dragagem a céu aberto, embora também se utilize, como meio suplementar, a mineração a seco (escavadoras).

A dragagem é efectuada num lago artificial de água doce com cerca de 700 metros de comprimento, 400 metros de largura e até 15 metros de profundidade, usando duas dragas aspiradoras-desagregadoras, que estão ligadas por meio de cabos e bombas de sucção a um concentrador húmido flutuante ("WCP") instalado atrás das dragas (Figs. III.8 e III.9).



Figura III.8 - Vista geral do lago artificial onde estão localizadas as dragas e o concentrador húmido flutuante ("WCP"). Fotografia cedida pela empresa Kenmare Resources em 2013.

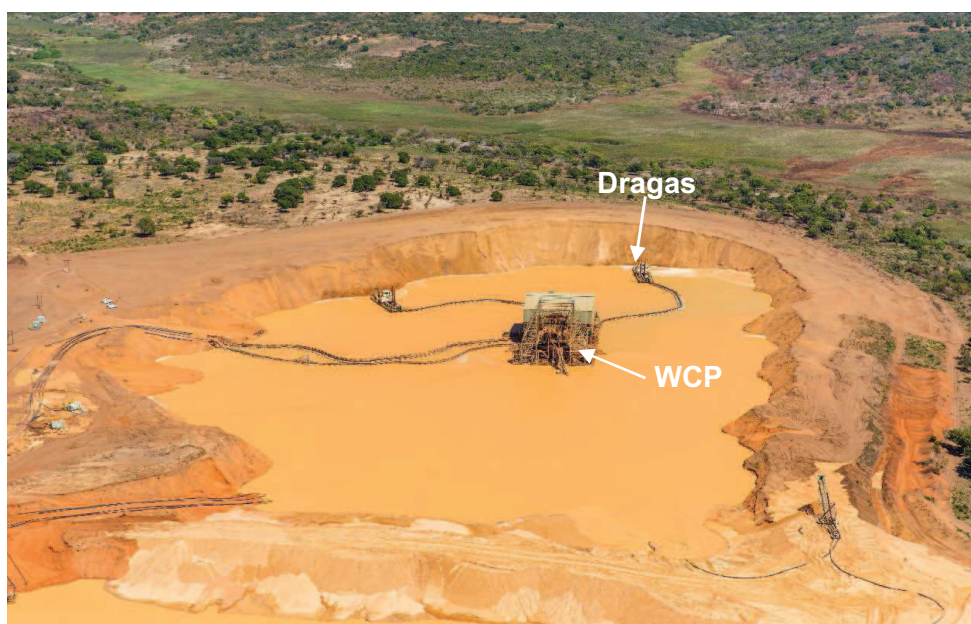


Figura III.9 – Outro aspecto do lago artificial onde estão localizadas as dragas e o concentrador húmido flutuante ("WCP"). Cedido pela empresa Kenmare Resources em 2013.

A grande vantagem deste método consiste em articular quatro operações (desmonte, extracção, transporte e beneficiamento) num único processo, permitindo aumentar a eficiência e a produtividade e rentabilizar, assim, os custos de produção.

Antes de se iniciar o desmonte e a remoção de material, a frente de exploração deve ser preparada, limpando a vegetação e retirando a camada de solo, a qual é transportada e empilhada numa área para reabilitação futura. Depois de extrair as areias ricas em minerais pesados, estas são depositadas no lago de dragagem e bombeadas para o WCP, onde irão ser processadas. Quando se justifica, recorre-se, também, a escavadoras móveis convencionais que recolhem o minério, misturam-no com água e bombeiam-no para o WCP como material adicional.

III.3.2 CONCENTRAÇÃO DOS MINERAIS PESADOS

No concentrador húmido flutuante (WCP), o primeiro estágio de processamento consiste em passar as areias mineralizadas por dois peneiros, de modo a separar a fracção mais grosseira da mais fina. A fracção mais fina é sujeita, em seguida, a sucessivas fases de separação gravítica através de circuitos espirais até se obterem os concentrados de minerais pesados ("HMC"). Os resíduos deste processo são compostos essencialmente por areias ricas em silicatos leves e minerais de argila. A componente mais fina (argilosa) é redepositada no lago de dragagem para ser usada na revegetação e reabilitação do terreno.

Já os concentrados "HMC" são transferidos para a Unidade de Separação Mineral ("MSP"), onde são empilhados para posterior processamento, usando métodos gravíticos, magnéticos e electrostáticos (Figs. III.7 e III.10).

Na instalação MSP, os concentrados de minerais pesados são inicialmente transportados para um secador. Após secagem, procede-se a uma separação magnética de baixo campo em que se recupera a ilmenite (fracção magnética) e extrai a fracção não magnética, a qual será submetida a um tratamento adicional através de uma separação electrostática para isolar o rútilo (condutor). A fracção não condutora obtida neste processo é sujeita a uma separação por densidade em mesas vibratórias e a uma nova separação electrostática para produzir o zircão. O material remanescente (resíduo) é devolvido para a lagoa de dragagem.

III.3.3 ARMAZENAMENTO E TRANSPORTE

Por fim, os produtos finais são depositados num armazém com capacidade para 145.000 toneladas, equipado com um tapete rolante de 1,5 km de comprimento, que

desemboca directamente no cais, onde é carregado para o navio de transbordo da empresa e transportado para um ponto de transbordo de águas profundas, situado a 10,5 km da costa (Fig. III.11).



Figura III.10 – Vista da Unidade de Separação (“MSP”). Cedido pela empresa Kenmare Resources em 2013



Figura III.11 – Silos de armazenamento e tapete rolante.

III.4 SONDAGENS

Uma parte significativa do trabalho efectuado durante o estágio na empresa, envolveu o acompanhamento de operações de sondagem.

No mapa da Figura III.12 mostra-se a localização dos furos de sondagem realizados na área de exploração. Nas sondagens, usa-se uma perfuradora de marca EVH e fabrico Australiano, com um sistema de circulação de ar inverso (*Air Reverse Circulation Drill*) e um tipo de óleo que permite amolecer o furo e compactar a parte superficial da área.

A perfuradora tem capacidade para atingir profundidades de 60 m, através da conexão de sucessivos tubos com 3 m de comprimento cada (Fig. III.13). A recuperação da amostra faz-se através da injeção de ar comprimido produzido em compressores de 105 até 150 PSI.

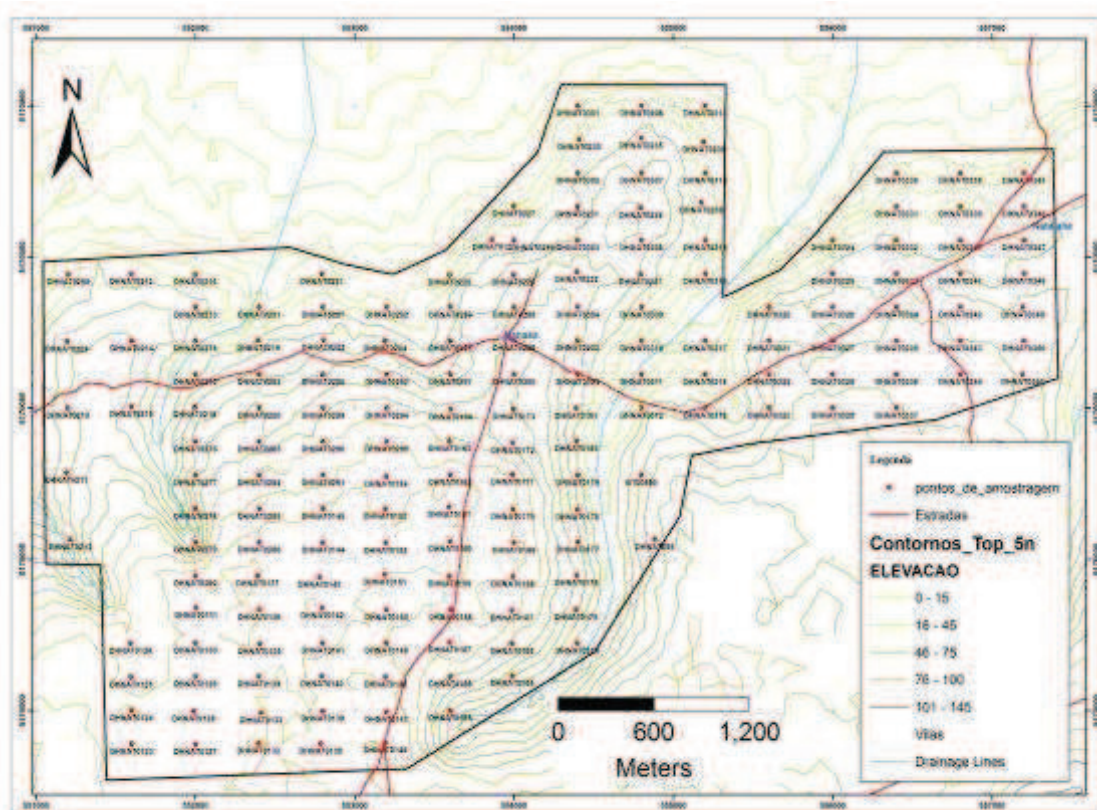


Figura III.12 – Mapa de localização de sondagens e furos de amostragem do solo). Cedido por Langa, Geólogo da empresa Kenmare Resources em 2013.

Os furos são enumerados e referenciados através das coordenadas fornecidas por GPS para facilitar a sua localização. A malha de perfuração é de 200 x 400 metros e a profundidade máxima dos furos não ultrapassa os 50 m, havendo casos em que se tem que interromper a sondagem devido à ocorrência de níveis compactos de argila.

As amostras de sondagem são recolhidas e identificadas, metro a metro, e guardadas em sacos devidamente referenciados com o número do furo e a profundidade

(ID), designados localmente por “calicos” (Fig. III.14). No interior de cada saco introduz-se um rótulo de alumínio com o mesmo ID (Fig. III.14).



Figura III.13 – Aspecto da máquina de perfuração EVH de fabrico Australiano.



Figura III.14 – Aspecto dos “calicos”

Ainda no campo, procede-se a uma separação à bateia de uma fracção de cada saco para fazer uma estimativa das percentagens dos diferentes minerais pesados presentes nas amostras (Fig. III.15). Por fim, transportam-se os sacos para o armazém de amostras da Kenmare, onde são arrumados ao ar livre, para secarem mais rapidamente, facilitando o seu tratamento posterior (Fig. III.16).

Numa fase subsequente, os testemunhos de sondagem são analisados laboratorialmente. Para o efeito, retiram-se aproximadamente de 100 gramas de cada saco e procede-se à sua descrição macroscópica (cor, granularidade, natureza dos

minerais pesados). Adiciona-se água à amostra e com o auxílio de uma bateia metálica, estimam-se as percentagens dos diferentes tipos de minerais pesados (Fig. III.17).



Figura III.15 – Separação á bateia



Figura III.16 – Armazém das amostras recolhidas em sondagens

Só depois de concluída esta etapa, é que se inicia o processo de separação magnética que envolve os seguintes passos (Fig. III.18):

- separação da amostra a uma intensidade de corrente de 2,2 A
- separação da amostra a uma intensidade de corrente de 3,6 A
- pesagem das fracções recolhidas e cálculo das sua proporções.

De uma forma geral, as percentagens de EHM nas areias de Moma variam entre 12 a 20% e tendem a aumentar com a profundidade. Nas proximidades da camada

argilosa de base estéril (unidade 9), as suas proporções podem, contudo, sofrer uma redução para cerca de 9%.



Figura III.17 – Separação à bateia no laboratório da empresa (2013)



Figura III.18 – Laboratório de separação magnética instalado na Unidade de Separação (“MSP”)

CAPÍTULO IV:

MATERIAIS E MÉTODOS

CAPÍTULO IV: MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, descrevem-se os materiais e métodos usados durante a execução do presente estudo. A componente laboratorial foi realizada essencialmente no Departamento de Geociências e no laboratório de Microscopia Electrónica de Varrimento (MEV) do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro (UA) e envolveu três etapas principais:

- Análise dos concentrados de minerais pesados por Difracção de Raios X (DRX)
- Separação de minerais (zircões e monazites), o que incluiu a crivagem das amostras de minerais pesados, separação magnética, purificação dos concentrados com líquidos densos e separação com lupa binocular;
- Obtenção de análises no Microscópio Electrónico de Varrimento (MEV).

IV.1 AMOSTRAGEM

Durante o estágio realizado na empresa Kenmare Resources em Agosto de 2013, foram recolhidas quatro amostras de concentrados de zircão para estudo mineralógico. De acordo com os objectivos iniciais do projecto, a amostragem deveria ter sido efectuada de modo a cobrir as diferentes fases de exploração da jazida, desde a extracção das areias até ao produto acabado. No entanto, por razões de confidencialidade da empresa, só foi autorizada a saída de amostras contendo concentrados de zircão, o que impediu a caracterização da matéria prima original e limitou seriamente o estudo desenvolvido sobre a associação dos principais minerais pesados presentes no depósito (ilmenite, rútilo e zircão).

IV.2. DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A técnica de difracção de raios X permite identificar e quantificar as diferentes fases cristalinas presentes em materiais geológicos e constitui, por isso, uma ferramenta de extrema importância na área da Geociências. Trata-se de uma técnica não destrutiva que se baseia no modo como a estrutura cristalina de um mineral interage com os raios X.

Quando os raios X incidem numa substância com uma estrutura aleatória não cristalina, os raios X são dispersos em todas as direcções. Em contrapartida, se a substância possuir uma estrutura atómica ordenada com planos cristalinos bem definidos,

ocorrerá interferência construtiva dos raios X (difracção). O efeito de difracção causado pelas células unitárias de cristais expostos a um feixe monocromático de raios X é traduzido pela chamada Lei de Bragg (Fig. IV.1):

$$n \lambda = 2d \sin \theta$$

em que:

n – é um nº inteiro, representando os harmónicos de λ

λ - é o comprimento de onda da radiação incidente

d – é a distância reticular entre os planos sucessivos do cristal

θ - é o ângulo de Bragg ou ângulo de incidência dos raios X com o plano reticular.

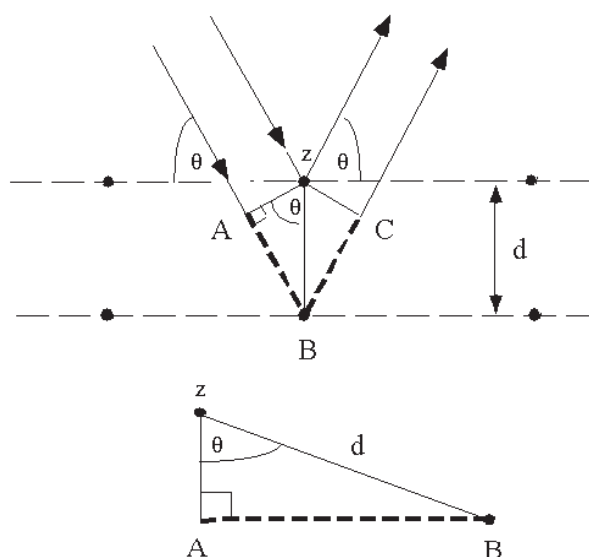


Figura IV.1: Derivação da lei de Bragg. θ é o ângulo da radiação incidente com o plano de átomos em análise, d é a distância entre planos e ABC o percurso extra que a radiação difractada pelo átomo B tem de percorrer.

Como as distâncias entre planos cristalinos sucessivos e a densidade de átomos ao longo desses planos são características únicas e específicas de cada espécie mineral, o padrão difractométrico equivale a uma impressão digital do mineral. Através da combinação das posições angulares dos picos com as suas respectivas intensidades torna-se assim possível proceder à identificação das diferentes fases mineralógicas.

Neste trabalho, a análise mineralógica por difracção de raios X incidiu nos concentrados de zircão fornecidos pela empresa, tendo como principal objectivo aferir o grau de pureza dos concentrados. As análises difractométricas foram realizadas no Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro, num espectrómetro Phillips Panalytical X'Pert Pro, equipado com um gerador MPPC, um goniómetro PW3050 e um

microprocessador PW3040/60 com uma impressora acoplada. Usou-se a radiação $\text{CuK}\alpha$, uma intensidade de corrente de 20 mA, uma diferença de potencial de 40 kV e uma janela de varrimento no intervalo 2 a 80° (2θ).

A identificação das fases cristalinas correspondentes aos diferentes picos observados foi feita através do software XPOWDER, que permite comparar os picos teóricos de cada mineral com os do difractograma e calcular automaticamente as áreas dos picos de intensidade máxima, gerando um relatório final com a informação obtida. Após a identificação das fases cristalinas procedeu-se à estimativa da sua abundância relativa (análise semi-quantitativa).

A semi-quantificação tem como premissa base a existência de uma relação directa entre as intensidades dos máximos de difracção característicos de cada mineral e a sua abundância (Gomes, 1979). No entanto, antes de se calcularem as proporções relativas de cada fase mineral, as áreas do pico de intensidade máxima de cada mineral identificado devem ser divididas pelos seus respectivos poderes reflectores. Os poderes reflectores são estimados empiricamente a partir da capacidade de cada mineral para difractar a radiação incidente e produzir picos mais ou menos intensos. Dado o erro associado ao método, os valores obtidos são meramente indicativos e não devem ser considerados como teores absolutos.

A preparação das amostras para análise de DRX incluiu os seguintes passos:

- (1) Moagem de cerca de 1g de amostra num almofariz de ágata até obter uma granulometria de cerca de 60 mesh (Fig. IV.2).
- (2) Introdução do pó obtido num porta-amostras de alumínio, comprimindo levemente o pó para evitar que os cristais se orientem preferencialmente (Fig. IV.2).
- (3) Realização da análise no difractómetro de Raios X (Fig. IV.3).

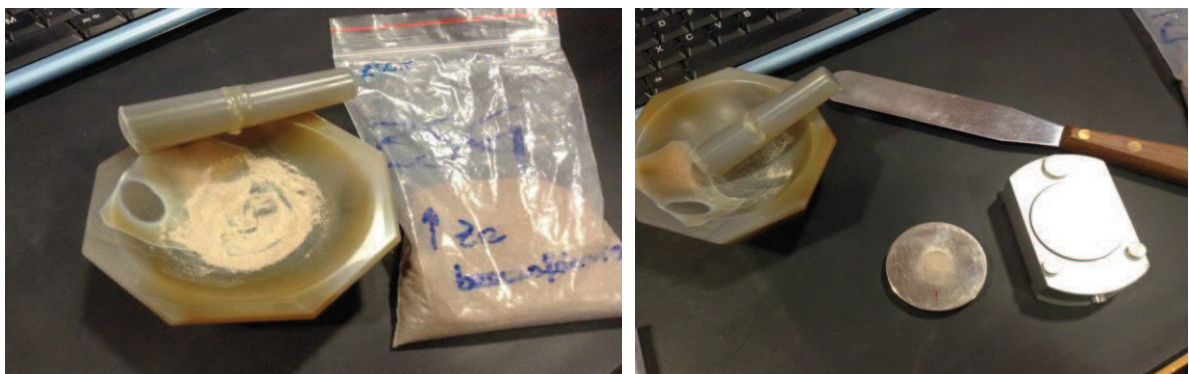


Figura IV.2: Preparação de amostras para a Difracção de raios X.

a)

b)



Figura IV.3: Laboratório de Difracção de raios X do Departamento de Geociências.

IV.3. SEPARAÇÃO DE MINERAIS PESADOS

Tendo em conta que todas as amostras disponibilizadas pela empresa correspondiam já a concentrados de zircões, concentrou-se o trabalho laboratorial na amostra ZSG para tentar estimar a quantidade de monazite presente no concentrado. O tratamento efectuado compreendeu cinco fases: (a) separação magnética usando o separador electromagnético de Frantz; (b) separação dos concentrados minerais por densidade usando bromofórmio; (c) nova separação magnética; (d) nova separação dos concentrados por densidade, usando iodeto de metileno e (e) observação dos grãos minerais à lupa binocular.

IV.3.1. SEPARAÇÃO MAGNÉTICA

A separação magnética tem como objectivo separar os minerais com susceptibilidades magnéticas mais elevadas (como é o caso da ilmenite) dos minerais menos magnéticos (zircão, monazite e rútilo). Para o efeito, a amostra é introduzida no funil de alimentação do separador electromagnético de Frantz e desliza numa calha vibrante, dividida a meio do percurso em dois sulcos. Depois de atravessar o electroíman, os minerais mais magnéticos são encaminhados para um dos sulcos, enquanto os menos magnéticos são encaminhados para o outro sulco. As duas fracções são recuperadas em dois copos localizados na extremidade da calha (Fig. IV.4).

A primeira fase de separação magnética consistiu em passar a amostra, em queda livre, no separador magnético, com o aparelho inclinado a 5° e, depois, a 10°, a uma intensidade de corrente de 2,0 A. Como seria de esperar, no caso presente, a quase

totalidade da amostra foi recuperada no copo reservado à fracção não magnética, uma vez que já tinha sofrido um tratamento prévio na empresa.



Figura IV.4: Separador Magnético Frantz.

IV.3.2. SEPARAÇÃO POR DENSIDADE (BROMOFÓRMIO)

A etapa subsequente teve como finalidade principal separar os minerais mais densos dos menos densos, usando bromofórmio (densidade igual a $2,89 \text{ g.cm}^{-3}$). O primeiro passo do procedimento envolve a montagem da estrutura em que se irá efectuar a separação.

O bromofórmio é um líquido altamente tóxico, pelo que o seu manuseamento deverá ser feito com extremo cuidado, no interior de uma hote parcialmente fechada, com a ventilação sempre ligada para reduzir os perigos de inalação de gases. Todo o material que entrar em contacto com o bromofórmio deverá ser lavado e desinfectado com acetona. Devido à sua sensibilidade à luz, o bromofórmio é armazenado em frascos de vidro escuro que são guardados em locais sem luminosidade para que este não altere as suas propriedades.

Depois de montar a estrutura, introduziu-se a fracção não magnética obtida anteriormente no interior do balão de decantação e adicionou-se bromofórmio até a cobrir completamente. Misturou-se o bromofórmio com a amostra e deixou-se a solução repousar.

Após alguns instantes, verificou-se que os minerais pesados se acumulavam na parte inferior do balão de decantação, havendo apenas uma pequena fracção de minerais leves que migraram para a parte superior. Abriu-se a torneira de decantação de modo a

que a fracção contendo os minerais mais densos passasse para o filtro do funil. Misturou-se novamente a porção da amostra que ficou retida no balão com o bromofórmio, deixou-se repousar e voltou a extrair-se a fracção rica em minerais densos.

Retirou-se então o funil com o filtro onde se depositaram os minerais com densidade superior a 2,89. Introduziu-se outro funil de filtração de maiores dimensões, abriu-se completamente a torneira e recolheu-se o resto da amostra. A fracção rica em minerais menos densos ($d < 2,89$) ficou retida no filtro deste funil e o bromofórmio foi colectado no copo de recepção (Fig. IV.5).



Figura IV.5: Material usado na separação com bromofórmio.

Depois de ter extraído todo o bromofórmio, guardou-se o copo de recepção para recuperar o bromofórmio mais tarde. Lavou-se o balão de decantação e as duas fracções da amostra com acetona e deixaram-se a secar dentro da hote durante cerca de 12 horas. Todo o material que esteve em contacto com o bromofórmio foi também passado por acetona e deixado a secar. Após evaporação, guardou-se a amostra num recipiente devidamente identificado.

IV.3.3. NOVA SEPARAÇÃO MAGNÉTICA

Depois da separação com o bromofórmio, a fracção contendo minerais com densidade superior a 2,89 foi sujeita a uma nova separação magnética no separador electromagnético Franz. Nesta fase, ajustou-se o separador magnético com uma inclinação vertical da calha de 20° e lateral de 10° e amperagens variáveis para individualizar a fracção rica em zircões da fracção contendo monazite (Fig. IV.6).

Tal como se mostra no esquema da Figura IV.6, o processo inicia-se com uma intensidade de campo magnético de 0,5 amperes e espera-se que toda a amostra passe pelo separador. A porção mais magnética é guardada, enquanto a porção não magnética é novamente passada pelo separador magnético a uma intensidade de campo de 1 ampere.

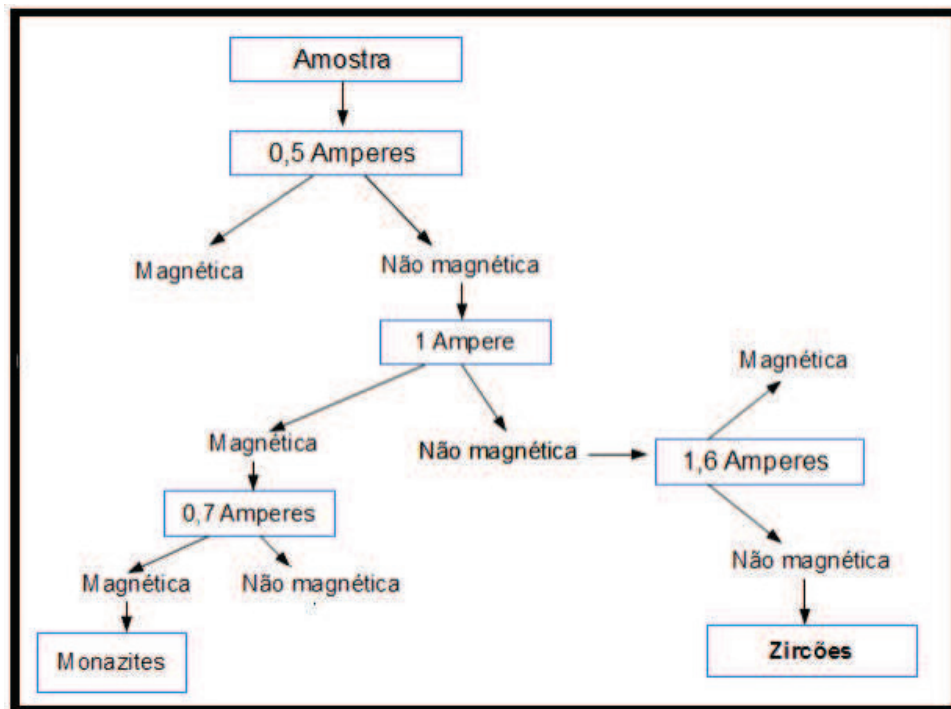


Figura IV.6: Sequência de procedimentos usados na separação magnética.

A porção mais magnética recolhida com a amperagem de 1 A é então submetida a uma nova separação com uma intensidade de campo magnético de 0,7 A, esperando-se que as monazites fiquem concentradas na fracção mais magnética obtida nesta passagem.

Por outro lado, a porção não magnética retirada a 1 A é introduzida no separador magnético Frantz a uma intensidade de 1,6 A e os zircões deverão ficar retidos na fracção não magnética desta separação.

IV.3.4. SEPARAÇÃO POR DENSIDADE (IODETO DE METILENO)

Para terminar o processo de separação, os concentrados de zircão e monazite foram passados por iodeto de metileno (densidade de $3,325 \text{ g.cm}^{-3}$), seguindo um procedimento muito semelhante à passagem por bromofórmio descrita anteriormente.

Nesta etapa, as amostras foram introduzidas em balões de decantação mais pequenos e cobertas com iodeto de metileno. Misturou-se bem a amostra com o líquido e deixou-se repousar a solução até que os grãos mais pesados se acumulassem na base do balão (Fig. IV.7). Em seguida, abriu-se a torneira de decantação e extraiu-se a fracção rica em minerais densos para o funil de filtração. Repetiu-se a operação até não se verem mais grãos em suspensão, após o que se retirou o funil e o filtro com a fracção pesada.

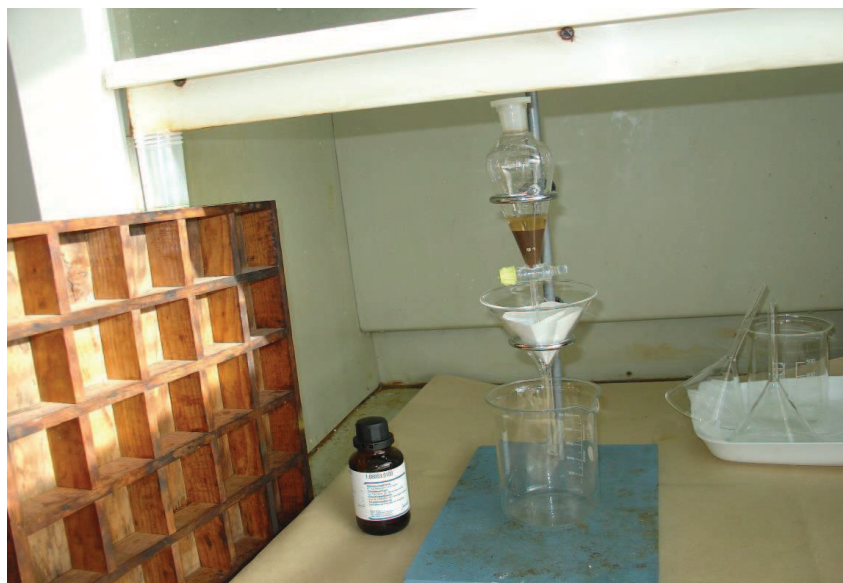


Figura IV.7: Material usado na separação com iodeto de metileno.

Em seguida, introduziu-se outro funil de filtração, recuperou-se a fracção mais leve no filtro e deixou-se o iodeto de metileno passar para o copo de recepção. Lavaram-se as amostras com acetona e deixaram-se a evaporar dentro da hote. O iodeto de metileno foi guardado num frasco.

IV.3.5. OBSERVAÇÃO À LUPA BINOCULAR

Terminada a etapa de separação e evaporação, observaram-se á lupa binocular os concentrados minerais de todas as fracções obtidas na fase de separação magnética descrita na secção IV.3.3. Para o efeito, introduziram-se as amostras em caixas de Petri, adicionou-se um pouco de álcool e identificaram-se os grãos com base nalgumas das suas propriedades físicas (cor, brilho, grau de transparência, hábito) (Fig. IV.8).

Os resultados obtidos revelaram que as fracções obtidas quando se aplicou o esquema indicado na Figura IV.6 eram todas ricas em zircão, o que implica que o método usado não permitiu separar eficientemente a monazite. Optou-se, por isso, por utilizar um

esquema diferente de separação magnética para as amostras disponibilizadas pela empresa (ZSG, ZCF, HAL-N/M, RUT/NC), que se sintetiza na secção seguinte.



Figura IV.8: Lupa binocular WILD utilizada na observação dos concentrados de minerais pesados.

IV.4. SEPARAÇÃO MAGNÉTICA DAS RESTANTES AMOSTRAS

No novo esquema de separação magnética, ajustou-se o separador magnético com uma inclinação vertical da calha de 15° e lateral de 6° e passaram-se as amostras a uma amperagem de 1,2 A (Fig. IV.9).

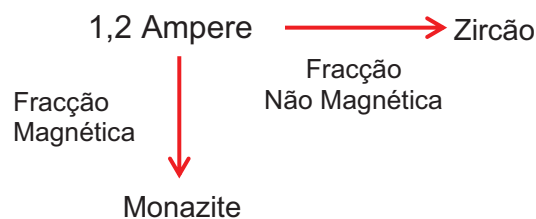


Figura IV.7: Esquema de separação magnética

A porção mais magnética contém a monazite, enquanto o zircão fica concentrado na fracção não magnética.

IV.5. CONTAGEM DOS GRÃOS À LUPA BINOCULAR

Seguiu-se a contagem sistemática dos grãos à lupa binocular, usando a cor como principal característica distintiva. Esta contagem incidiu nos seguintes tipos de fracções:

- (1) alíquotas das quatro amostras disponibilizadas pela empresa antes de serem sujeitas aos processos de separação magnética e de tratamento com líquidos densos realizados na UA;
- (2) fracções magnéticas obtidas a partir da separação magnética a uma intensidade de 1,2 A (secção IV.4);
- (3) fracções de zircão e monazite obtidas depois da separação com o iodeto de metileno.

IV.6. ANÁLISES NO MICROSCÓPIO ELECTRÓNICO DE VARRIMENTO (MEV)

O microscópio electrónico de varrimento (MEV) é um aparelho que pode fornecer informações relevantes tanto sobre a morfologia dos cristais, como sobre a natureza dos elementos químicos presentes na sua constituição. Para além da sua elevada resolução e grande profundidade de foco, este equipamento tem a capacidade de produzir espectros EDS dos diferentes grãos minerais e estimar a sua composição química, complementando a informação adquirida por outras técnicas de análise tais como acoplamento de microanálise de raios x (EDS), observação dos grãos.

IV.7 TRATAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

Após a colheita de dados laboratoriais, procedeu-se à sua compilação, tratamento e interpretação, o que envolveu a construção de tabelas, diagramas, figuras e gráficos ilustrativos e o estudo aprofundado de alguns tópicos.

CAPÍTULO V: RESULTADOS E CONCLUSÕES

CAPÍTULO V: RESULTADOS E CONCLUSÕES

Este capítulo inicia-se com uma breve introdução sobre as características dos minerais pesados presentes na jazida de Moma, apresentando-se, em seguida, os resultados dos estudos realizados nas quatro amostras disponibilizadas pela empresa (ZSG, ZSF, HAL e N/M). Por fim, sintetizam-se as principais conclusões retiradas neste trabalho.

V.1 CARACTERIZAÇÃO DE MINERAIS PESADOS

Como foi referido no capítulo precedente, não foi possível obter amostras representativas das diferentes fases de exploração do depósito de areias pesadas de Moma, o que obrigou a cingir o estudo aos concentrados de zircão cedidos pela empresa (amostras ZSG, ZCF, HAL-N/M, RUT/NC). Nestas circunstâncias, torna-se inexequível determinar o padrão de distribuição dos EHM na jazida e proceder a uma caracterização exaustiva das outras fases minerais densas (em particular, a ilmenite), que ocorrem conjuntamente com o zircão, pois a maior parte destes constituintes minerais foram previamente separados e já não estão presentes nas fracções estudadas. Para além disso, as espécies minerais mais leves associadas ao depósito também não podem ser descritas, dado que foram quase totalmente removidas durante as várias fases de purificação realizadas na empresa.

Apesar das limitações acima mencionadas, a investigação desenvolvida no âmbito desta dissertação permitiu adquirir informação complementar sobre as propriedades físicas (cor, morfologia, brilho, grau de alteração) das diferentes espécies minerais presentes nos concentrados analisados, bem como sobre a sua composição química.

V.1.1 MINERAIS PESADOS

Designam-se por "minerais pesados" os grãos mineralógicos com pesos específicos superiores a $2,85 \text{ g/cm}^3$. Distinguem-se dos minerais comuns como é o caso do quartzo ($d = 2,65$) e dos feldspatos ($d = 2,56\text{-}2,76$) pelas suas elevadas densidades (Dias, 2004). Os minerais pesados são provenientes de rochas ígneas e metamórficas onde estão disseminados em proporções muito baixas (fases acessórias) e acabam por ser incorporados nos sedimentos resultantes da sua desagregação em percentagens geralmente inferiores a 1%, podendo ser sucessivamente concentrados durante o (s)

ciclo(s) sedimentar(es). Ocorrem como minerais acessórios numa grande variedade de rochas ígneas e metamórficas, sendo o epidoto, a estauroilite, a distena, a granada e a andaluzite geralmente indicativos de uma origem metamórfica, enquanto a ilmenite, a magnetite, o zircão, o rútilo, a turmalina e a anfíbola se encontram tanto em rochas metamórficas como magmáticas e a olivina e as piroxenas estão tipicamente presentes em rochas ígneas básicas. Através da análise detalhada das espécies minerais associadas a um determinado “placer”, é possível, por isso, identificar, em muitos casos, a proveniência dos sedimentos.

No entanto, tal como foi documentado por Morton & Hallsworth (1994), a utilização dos minerais pesados como traçadores da origem de depósitos sedimentares ou como indicadores da dinâmica sedimentar nem sempre é fácil e pode conduzir a conclusões erradas, devido à multiplicidade de factores envolvidos na sua génese.

Segundo Addad (2001), os minerais pesados podem mostrar dois tipos diferentes de comportamento. Alguns existem em quantidades muito pequenas na rocha fonte, mas tendem a enriquecer nos sedimentos devido à sua elevada resistência (zircão, turmalina, rútilo), ao passo que outros podem ser relativamente abundantes na fonte, mas são alterados durante os processos de meteorização e transporte e não chegam a acumular-se nos depósitos sedimentares detríticos (anfíbolas, piroxena e olivinas). Embora a ordem de estabilidade química e mecânica dos minerais pesados seja, ainda hoje, alvo de controvérsia, a escala proposta por Pettijohn *et al.* (1987) é aceite pela maioria dos autores (Tabela V.1).

A forma, o tamanho original dos grãos minerais na rocha matriz, a natureza do meio de transporte e o ambiente de deposição são outros dos factores que influenciam a distribuição dos minerais pesados (Suguio, 1980). A forma dos grãos de cada espécie mineral depende, em primeiro lugar, da sua composição química e do arranjo espacial dos átomos na sua estrutura. Contudo, o desgaste produzido durante o transporte e a deposição pode conduzir a uma redução significativa do tamanho de grão e a um aumento progressivo do grau de arredondamento (i.e. suavização das suas arestas e saliências). Em geral, o grau de arredondamento tende a aumentar com a distância entre a área-mãe e o local de deposição.

Por outro lado, as diferenças de esfericidade entre cristais (ou seja, a relação entre os seus eixos axiais), também pode afectar a sua distribuição, uma vez que os minerais com forma menos esférica e menor peso específico são transportados para mais longe do que os grãos com maior esfericidade e densidades mais altas, mesmo que os seus diâmetros sejam semelhantes (Suguio, 1980).

Tabela V.1: Estabilidade dos minerais pesados mais comuns (Pettijohn *et al.*, 1987)

MINERAIS PESADOS	ESTABILIDADE
Muito instáveis	Olivina
Instáveis	Homblenda Actinolite Augite Diópsido Hiperstena Andaluzite
Moderadamente estáveis	Epídoto Distena Granada rica em ferro Silimanite Titanite Zoizite
Estáveis	Apatite Granada pobre em ferro Estauroilite Monazite
Ultra-estáveis	Rútilo Zircão Turmalina Anatase Ilmenite Magnetite

Todos os aspectos descritos têm influência na associação de minerais pesados encontrada nos sedimentos, pelo que as ilações retiradas a partir das suas características físico-químicas devem ser manuseadas com extremo cuidado, sobretudo em estudos de proveniência.

V.1.1.2 ILMENITE, RÚTILO, ZIRCÃO, MONAZITE E TURMALINA

Com base na informação recolhida na bibliografia (Dana & Hurlbut, 1993, Deer *et al.*, 2000), sintetizam-se, em seguida, as principais características da ilmenite, rútilo, zircão, monazite e turmalina, que são as fases minerais mais comuns na associação de minerais pesados das areias de Moma.

A **ilmenite** é um óxido de ferro e titânio (FeTiO_3) que cristaliza no sistema trigonal. Apresenta cor preta, brilho metálico a sub-metálico, dureza 5,5 a 6,0 e um peso específico de $4,7 \text{ g/cm}^3$. Ocorre em cristais tabulares, frequentemente achatados e é atraída pelo campo magnético no separador de Frantz a intensidades de corrente entre 0,2 e 0,3 A. É encontrada como mineral acessório em diversas rochas ígneas e metamórficas e como grãos detríticos em “placers” do tipo “areia negra”, constituindo a principal fonte de titânio. O titânio é considerado um metal de importância estratégica

devido à sua ampla aplicação numa grande diversidade de indústrias (metalúrgica, química, eléctrica, cerâmica, aeroespacial, etc.).

O **rútilo** é um polimorfo de TiO_2 de alta temperatura. Está presente numa grande variedade de rochas (granitos, pegmatitos, gnaisses, micaxistos e calcários metamorfizados) e como fase detrítica em sedimentos. Cristaliza no sistema tetragonal e possui tonalidade preta, vermelha ou amarela alaranjada, brilho adamantino a sub-metálico, dureza 6,0 a 6,5, e um peso específico de 4,18 a 4,25 g/cm^3 . Forma com frequência, cristais prismáticos e a clivagem é ausente com terminações piramidais e faces estriadas. É extraído no separador electromagnético de Frantz a intensidades de corrente a partir de 0,5 A.

O **zircão** é um nesossilicato de zircónio (ZrSiO_4) que constitui um mineral acessório comum nas rochas ígneas, particularmente em granitos, granodioritos e sienitos, podendo também ocorrer em rochas metamórficas. Devido à sua elevada resistência à meteorização, está geralmente presente nos depósitos sedimentares detríticos. Tal como o rútilo, cristaliza no sistema tetragonal. É normalmente incolor, embora possa ter cor castanha, rosa ou amarela. Apresenta hábito prismático, com terminações bipiramidais, clivagem pouco visível, dureza 7,5, peso específico de 4,6 g/cm^3 , brilho vítreo ou adamantino e não é atraído pelo campo magnético. É usado como material refractário em moldes de fundição e no fabrico de cristais piezoeléctricos, como isolante e como pigmento na indústria cerâmica (Hedrick, 2001).

A **monazite** é um fosfato de terras raras, cuja fórmula química geral é dada por $(\text{Ce, La, Th, Nd, Y})\text{PO}_4$. Constitui uma fase acessória comum em rochas metamórficas, magmáticas, pegmatitos e aplitos. É medianamente resistente à meteorização e está, com frequência, concentrada sob a forma de mineral detrítico em areias fluviais e marinhas. É normalmente amarela a acastanhada, cristaliza no sistema monoclinico e possui hábito prismático, clivagem fraca, dureza 5,0 a 5,5, peso específico de 4,9 a 5,3 g/cm^3 , brilho resinoso e é atraída pelo campo magnético a intensidades de corrente de 0,5 A. É explorada como fonte de cério e de outras terras raras.

A **turmalina** é um silicato com uma composição química complexa $(\text{Na, Ca}) (\text{Li, Mg, Al}) (\text{Al, Fe, Mn})_6 (\text{BO}_3)_3 (\text{Si}_6\text{O}_{18}) (\text{OH})_4$. Ocorre essencialmente em pegmatitos graníticos, granitos, metapelitos e calcários metamorfizados, sendo um constituinte frequente em sedimentos detríticos. Dependendo da sua composição, pode ter cor preta, castanha, rosa, verde ou azul. Cristaliza no sistema trigonal sob a forma de prismas trigonais, possui brilho vítreo, clivagem não visível, dureza 7,0 a 7,5, peso específico de

2,9 a 3,25 g/cm³ e é atraída pelo campo magnético a intensidades de corrente entre 0,5 A e 0,8 A.

V.1.1.3 OBSERVAÇÃO À LUPA BINOCULAR

Mostra-se nas Figuras V.1, V2, V3 e V.4, o aspecto geral das associações minerais encontradas nas quatro amostras estudadas.

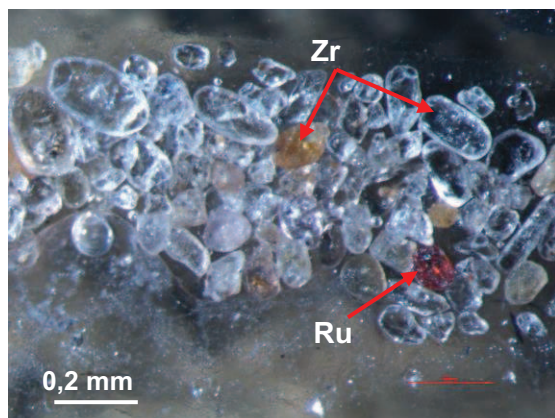


Figura V.1: Concentrado de zircão da amostra ZCF

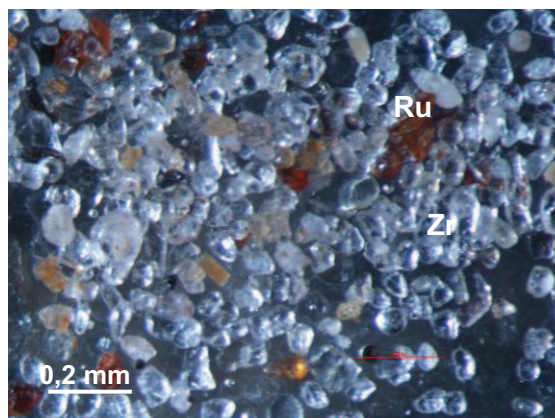


Figura V.2: Concentrado de zircão da amostra HAL N/M

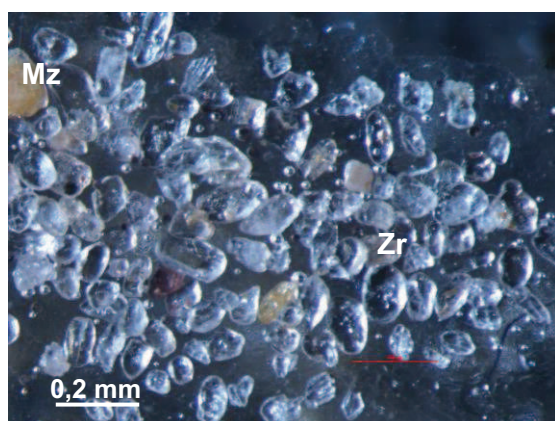


Figura V.3: Concentrado de zircão da amostra ZSG

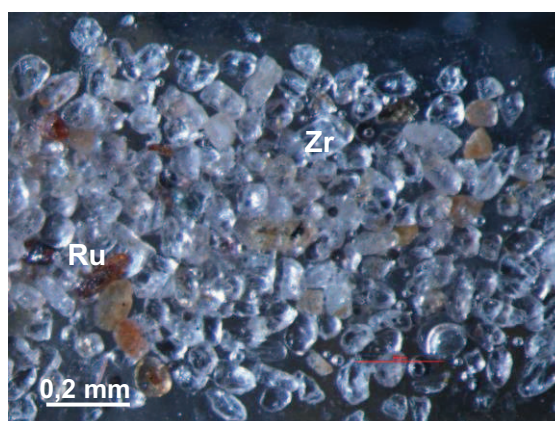


Figura V.4 – Concentrado de zircão da amostra RUT/NC

Zr =Zircão; Rut =Rutilo; Mz =Monazite.

Como se pode verificar nas imagens apresentadas, o zircão é o constituinte mineral dominante em todas as amostras estudadas, seguido pelo rútilo e pela monazite, o que indica que a ilmenite terá sido completamente removida destas fracções. Embora representem concentrados recolhidos em etapas distintas do processo de purificação realizado na empresa, as quatro amostras não apresentam diferenças significativas de composição mineralógica.

O zircão apresenta uma grande diversidade de cores e formas. A população mais abundante é composta por cristais transparentes, incolores ou ligeiramente rosados, com

brilho vítreo, formas variando de euédricas a anédricas, geralmente arredondadas e dimensões inferiores a 0,2 mm. Os grãos euédricos são predominantemente prismáticos e exibem, por vezes, terminações bipiramidais (Fig. V.1).

Em todas as amostras, se observa uma segunda população de cristais de zircão de cor amarela acastanhada e carácter translúcido, em que parecem predominar as morfologias arredondadas (Fig. V.1). A sua coloração acastanhada resulta da destruição da rede cristalina do zircão devido à desintegração radioactiva do urânio e tório. Estes grãos são, em geral, menos resistentes à meteorização, o que explica a sua menor abundância nos concentrados estudados.

O rútilo está presente em quantidades reduzidas nas quatro amostras sob a forma de grãos de cor vermelha, frequentemente bem arredondados, transparentes ou opacos de dimensões compreendidas entre 0,05 mm e 0,2 mm (Fig. V.1, V.2 e V.4). Mais raramente, parece ocorrer também em pequenos cristais opacos de cor negra.

A monazite é uma fase comum nos concentrados analisados, constituindo maioritariamente cristais muito arredondados de baixa esfericidade, transparentes ou translúcidos, com uma coloração típica amarelo limão e dimensões inferiores a 0,2 mm (Fig. V.3).

A contagem de grãos efectuada à lupa binocular permitiu estimar as proporções relativas destes três minerais pesados nas quatro amostras (Tabela V.2). O zircão é, nos quatro casos, o constituinte mineral maioritário (≈ 88 -96%), o que demonstra que o processo de concentração realizado na empresa é extremamente eficiente.

Tabela V.2: Abundâncias relativas de minerais pesados nas amostras estudadas

	ZCF	HAL N/M	ZSG	RUT/NC
	Abundâncias relativas em número de grãos			
Zircão (transparente)	113	102	110	115
Zircão (amarelo)	7	10	9	17
Rútilo (vermelho)	1	11	1	9
Monazite (limão)	5	4	4	5
Nº total de grãos	126	127	124	146
	Abundâncias relativas em %			
% Zircão (transparente)	89,68%	80,31%	88,70%	78,76%
% Zircão (amarelo)	5,55%	7,87%	7,25%	11,64%
% Rútilo (vermelho)	0,79%	8,66%	0,80%	6,16%
% Monazite (limão)	3,14%	3,14%	3,22%	3,42%
% total de zircão	95,23%	88,18%	95,96%	90,41%

V.1.1.4 SEPARAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Como foi referido no Capítulo IV, as amostras cedidas pela empresa foram sujeitas a uma separação magnética no separador de Frantz do Departamento de Geociências, usando uma intensidade da corrente de 1,2 A, inclinação vertical da calha de 15° e lateral de 6°, com o objectivo isolar a monazite do zircão.

As imagens das fracções magnéticas extraídas nesta operação, assim como os resultados da contagem de grãos são apresentados nas Figuras V.5 a V.8 e na Tabela V.3, respectivamente.

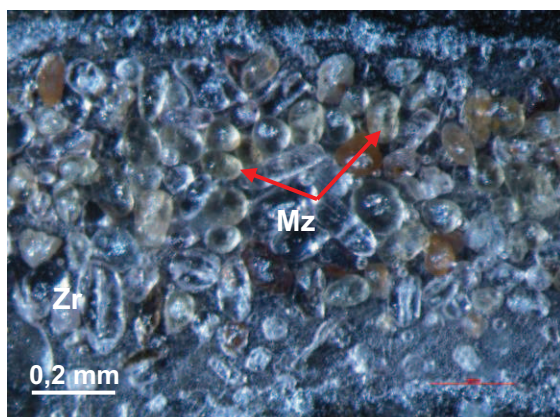


Figura V.5: Fracção magnética (1,2 A) da amostra ZCF

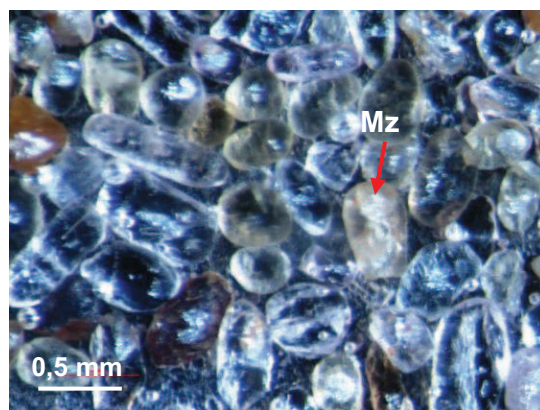


Figura V.6: Fracção magnética (1,2 A) da amostra HAL N/M

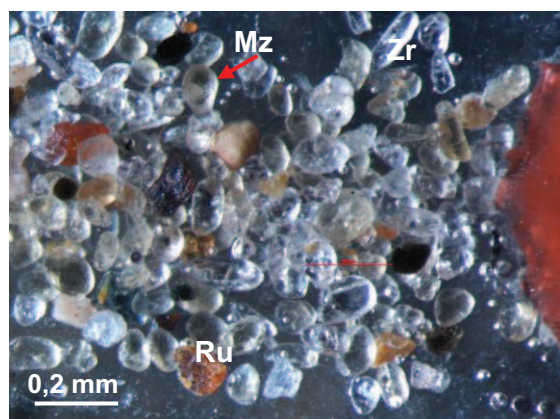


Figura V.7: Fracção magnética (1,2 A) da amostra RUT/NC

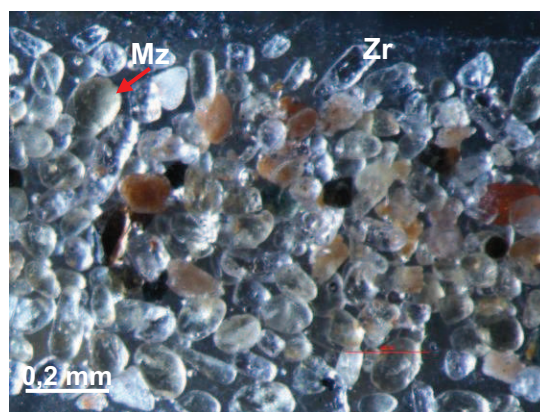


Figura V.8 – Fracção magnética (1,2 A) da amostra RUT/NC

Com excepção da amostra ZSG, que já tinha sido previamente sujeita a um esquema diferente de separação magnética e a uma passagem por líquidos densos (bromofórmio e iodeto de metileno), as fracções magnéticas de todas as restantes amostras contêm proporções significativamente mais altas de monazite (15 - 25%; Tabela V.3). Embora as abundâncias de zircão permaneçam elevadas, parece poder concluir-se que o procedimento usado permitiu concentrar a monazite com sucesso.

Tabela V.3: Abundâncias relativas de minerais pesados na fracção magnética extraída a uma intensidade de corrente de 1,2 A

	ZCF mag	HAL N/M mag	ZSG mag	RUT/NC mag
Abundâncias relativas em número de grãos				
Zircão (transparente)	103	112	91	125
Zircão (amarelo)	9	6	7	19
Rutilo (vermelho)	2	5	8	3
Monazite (limão)	24	22	3	50
Nº total de grãos	138	145	109	197
Abundâncias relativas em %				
% Zircão (transparente)	74,63%	77,24%	83,48%	63,45%
% Zircão (amarelo)	6,52%	4,13%	6,42%	9,64%
% Rutilo (vermelho)	1,44%	3,44%	7,33%	1,52%
% Monazite (limão)	17,39%	15,17%	2,75%	25,38%
% total de zircão	81,15%	81,37%	89,90%	73,09%

No caso da amostra ZSG, verificou-se que os resultados não foram tão animadores. A sequência de passos usada na preparação desta amostra está sintetizada no diagrama da Figura V.9 e os dados da contagem de grãos encontram-se sumarizados na Tabela V.4.

Tabela V.4: Comparação das abundâncias relativas de minerais pesados no concentrado original (ZSG-t) e nas fracções de zircão (ZSG-zr) e de monazite (ZSG-mo) extraídas da amostra ZSG seguindo o esquema da Figura V.9

AMOSTRA ZSG			
	ZSG-t	ZSG-Zr	ZSG-Mo
Abundâncias relativas em número de grãos			
Zircão (transparente)	115	152	88
Zircão (amarelo)	5	11	8
Rutilo (vermelho)	11	9	5
Monazite (limão)	1	2	4
Nº total de grãos	132	174	105
Abundâncias relativas em percentagem			
% Zircão (transparente)	87,12%	87,35%	83,80%
% Zircão (amarelo)	3,78%	6,32%	7,61%
% Rutilo (vermelho)	8,33%	5,17%	4,76%
% Monazite (limão)	0,75%	1,14%	3,80%
% total de zircão	90,91%	93,68%	91,43%

Através da análise da Tabela V.4, pode constatar-se que a fracção que deveria ter retido as monazites (Mz) não está tão enriquecida nesta fase mineral quanto seria desejável (% Mz = 3,80%) e que o seu conteúdo em zircão se mantém altíssimo (% Zr = 91,43%).



Figura V.9: Esquema de separação por densidade e susceptibilidade magnética aplicado à amostra ZSG

Por outro lado, a fracção onde supostamente se teria concentrado o zircão mostra apenas um ligeiro aumento dos teores deste mineral (% Zr = 93,68%) e ainda contém alguma monazite (% Mz = 1,14%), levando a concluir que este esquema de separação não permite isolar com eficiência a monazite do zircão.

Deve salientar-se, contudo, que a observação à lupa binocular das diferentes fracções extraídas por este método revelam que a monazite parecer ter sido preferencialmente removida na fracção magnética obtida pela passagem a uma intensidade de corrente de 0,5 A (Fig. V.9), o que poderá justificar a sua fraca representação na fase mais avançada do processo de separação.

V.1.1.5 DIFRACÇÃO DE RAIOS X

Os espectros de difracção de raios X para o concentrado original da amostra ZSG e para as fracções de monazite e zircão extraídas através do método ilustrado na Figura V.9 são apresentados na Figura V.10 a-b-c.

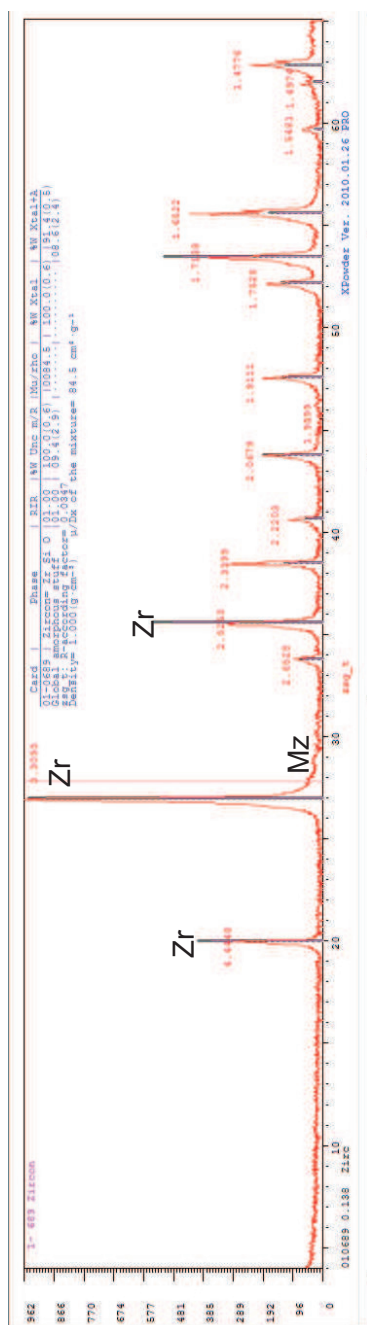
No difractograma do concentrado original (ZSG-t), o zircão é a fase mineralógica principal, sendo facilmente identificado pelos seus picos característicos encontrados a 3,30 Å (mais intenso), 4,43 Å, 2,52 Å e 1,71 Å (Fig. V.10a). Observa-se ainda uma posição de reflexão muito fraca a 3,09 Å e outra, menos nítida, a 2,87 Å, que poderão corresponder a monazite, já que o terceiro pico de maior intensidade deste mineral se sobrepõe com o do zircão a 3,30 Å (Fig. V.10a).

O zircão é também o constituinte mineralógico essencial na fracção não magnética extraída após passagem no separador magnético Frantz a 1,6 Amperes (ZSG-zr), não se tendo observado os picos característicos de mais nenhuma fase mineral (Fig. V.10b).

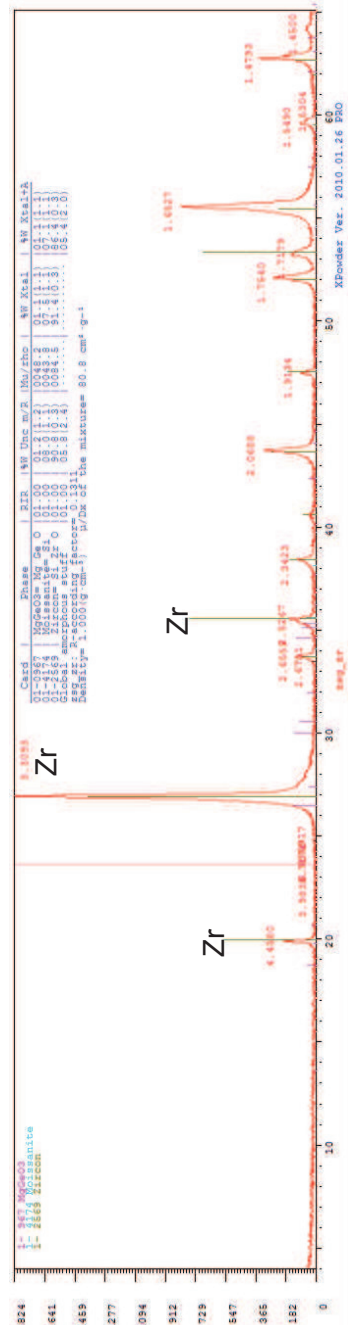
Por fim, e tal como seria de esperar pelas baixas percentagens de monazite na fracção onde supostamente deveria ter ficado concentrada (Tabela V.4), não foi possível identificá-la por difracção de raios X (Fig. V.10b). Nesta amostra parece existir, contudo, algum rútilo com reflexões a 1,69 Å e 2,49 Å, estando o pico principal (3,25 Å) possivelmente mascarado pelo do zircão (Fig. V.10b).

No seu conjunto, os dados obtidos por difracção de raios X confirmam as conclusões retiradas a partir da observação à lupa binocular (secção V.5) e demonstram que o método de separação utilizado para esta amostra não conduziu a resultados muito satisfatórios.

(a) Conc. original (ZSG-t)



(b) zircão (ZSG-zr)



(c) monazite (ZSG-mo)

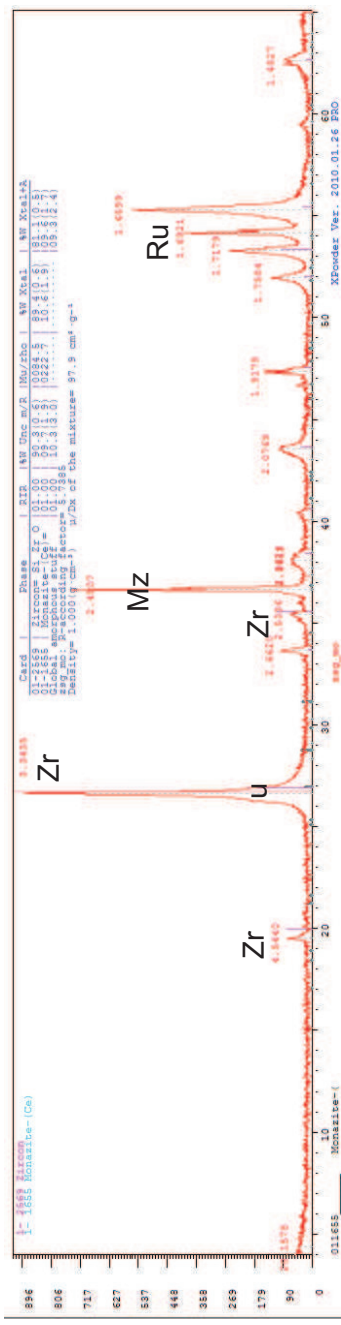


Figura V.10: Difractogramas obtidos para a amostra ZSG. (a) Concentrado original, (b) fracção rica em zircão, (c) fracção rica em monazite

V.1.1.6 MICROSCÓPIO ELECTRÓNICO DE VARRIMENTO (MEV)

Com o objectivo de recolher informação química complementar sobre as fases minerais pesados presentes no depósito de Moma, efectuou-se um estudo no microscópio electrónico de varrimento do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro (UA). Dada a semelhança mineralógica das quatro amostras, as análises incidiram apenas sobre o concentrado original e a fracção magnética da amostra ZCF.

Como se pode verificar nas imagens da Figura V.11 (a-b-c), o zircão é o constituinte mineral dominante no concentrado original, sendo facilmente reconhecido pelas suas elevadas concentrações em Si e Zr (Tabela V.5).

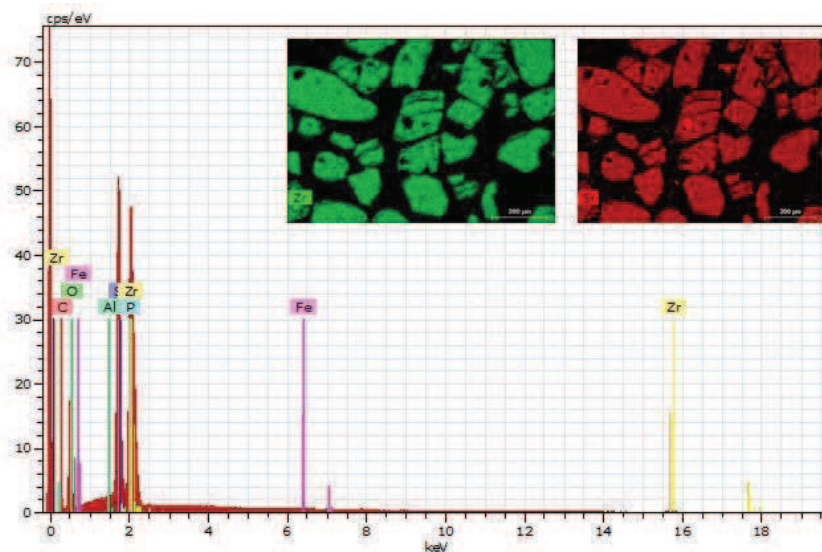
Tabela V.5: Composições químicas dos cristais de zircão da amostra ZCF (concentrado original)

Espectro do cristal de zircão P1					
Elemento Químico	Series	Conc. não normalizada % peso	Conc. norm. % peso	Conc. Atom. % atom.	Erro Sigma % peso
Carbono- C	K-series	11.80	15.03	28.75	4.99
Oxigénio- O	K-series	25.53	32.53	46.70	9.06
Silício- Si	K-series	9.93	12.65	10.35	1.35
Zircónio-Zr	L-series	24.30	30.97	7.80	2.84
Fósforo- P	K-series	6.33	8.07	5.99	0.81
Ferro- Fe	K-series	0.38	0.49	0.20	0.12
Alumínio-Al	K-series	0.20	0.26	0.22	0.11
	Total	78.47	100.00	100.00	

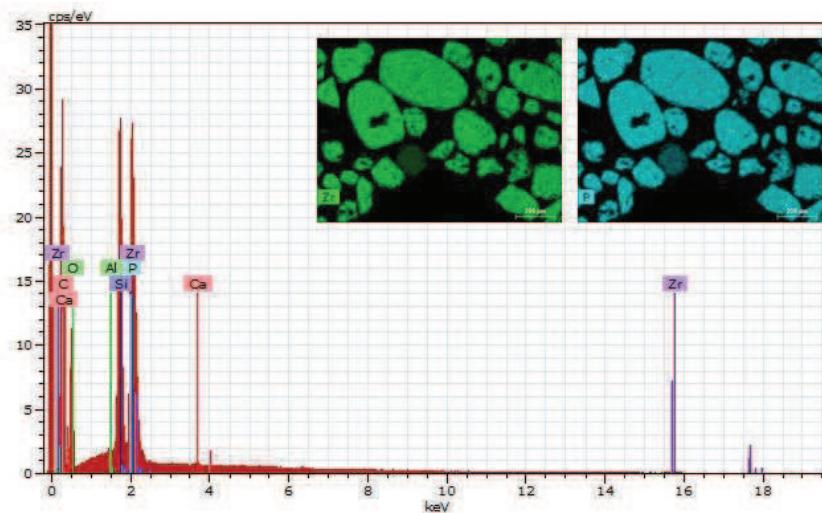
Espectro do cristal de zircão P4b					
Elemento Químico	Series	Conc. não normalizada % peso	Conc. norm. % peso	Conc. Atom. % atom.	Erro Sigma % peso
Carbono- C	K-series	7.44	10.87	22.75	3.29
Oxigenio-O	K-series	20.83	30.43	47.80	7.38
Silício- Si	K-series	9.10	13.30	11.90	1.24
Zircónio- Zr	L-series	24.67	36.03	9.93	2.88
Fósforo-P	K-series	6.35	9.28	7.53	0.81
Alumínio- Al	K-series	0.07	0.10	0.09	0.09
	Total	68.46	100.00	100.00	

Espectro do cristal de zircão P6					
Elemento Químico	Series	Conc. não normalizada % peso	Conc. norm. % peso	Conc. Atom. % atom.	Erro Sigma % peso
Carbono-C	K-series	40.85	51.98	69.10	14.03
Oxigénio-O	K-series	17.81	22.67	22.62	6.46
Silício- Si	K-series	4.97	6.33	3.60	0.71
Zircónio- Zr	L-series	11.84	15.07	2.64	1.42
Fósforo- P	K-series	3.06	3.89	2.01	0.43
Alumínio- Al	K-series	0.05	0.06	0.04	0.08
	Total	78.58	100.00	100.00	

(a) Espectro do cristal de zircão P1 – amostra ZCF



(b) Espectro do cristal de zircão P4 – amostra ZCF



(c) Espectro do cristal de zircão P6 – amostra ZCF

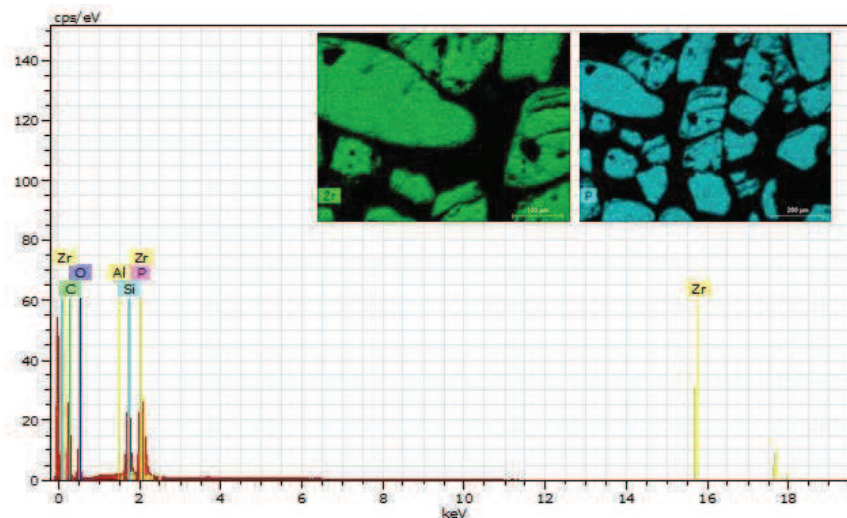


Figura V.11 Espectros MEV/EDS de cristais de zircão da amostra ZCF (concentrado original). Silício (vermelho); zircónio (verde), fósforo (azul)

Todos os cristais de zircão analisados contêm teores relativamente altos de fósforo (Fig. V.11), que parecem estar uniformemente distribuídos e não variar significativamente de grão para grão, sugerindo que este elemento químico possa estar a substituir o silício na estrutura cristalina do zircão para preservar a neutralidade eléctrica (Deer *et al.*, 2000). Este tipo de substituição está normalmente relacionada com a formação de xenotime (YPO_4) (Romans *et al.*, 1975). Já a ocorrência de pequenas proporções de ferro nalguns dos cristais deverá reflectir a presença de inclusões de outros minerais ricos neste elemento.

Embora com carácter muito subordinado, identificaram-se nesta amostra cristais de rútilo e de monazite (Fig. V.12 a-b; Tabela V.6). Para além de titânio e oxigénio, os cristais de rútilo apresentam, em geral, picos no nióbio e no ferro de amplitude variável, como é comum neste mineral (Deer *et al.*, 2000).

Tabela V.6: Composições químicas dos cristais de rútilo e monazite da amostra ZCF (concentrado original)

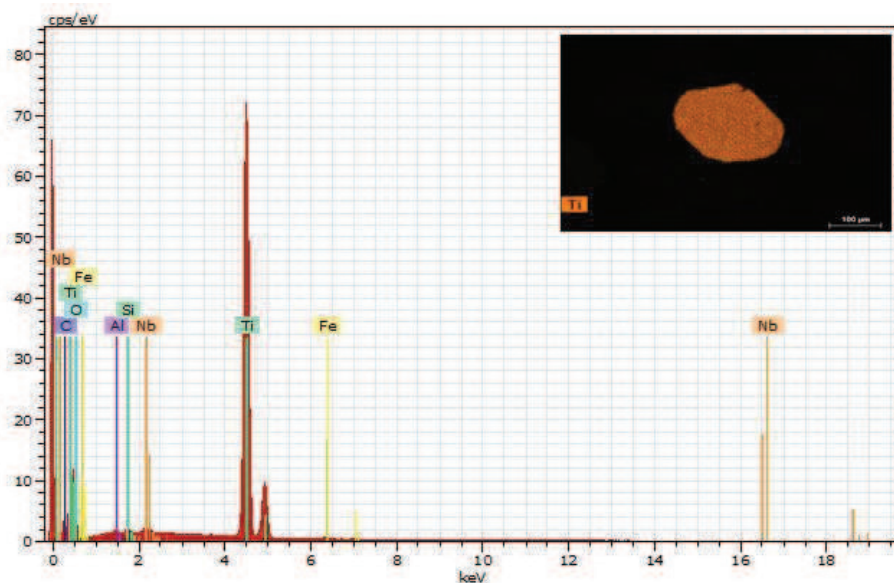
Espectro do cristal de rútilo P1r					
Elemento Químico	Series	Conc. não normalizada % peso	Conc. norm. % peso	Conc. Atom. % atom.	Erro Sigma % peso
Oxigénio- O	K- series	44.28	44.73	70.72	15.88
Titânio- Ti	K- series	53.89	54.44	28.76	4.54
Ferro- Fe	K- series	0.29	0.29	0.13	0.11
Silício- Si	K- series	0.17	0.17	0.15	0.10
Alumínio- Al	K- series	0.07	0.07	0.06	0.09
Nióbio - Nb	L- series	0,02	0,02	0,01	0,08
Cálcio- Ca	K- series	0.27	0.27	0.17	0.10
	Total	98.99	100.00	100.00	

Espectro do cristal de monazite P3					
Elemento Químico	Series	Conc. não normalizada % peso	Conc. norm. % peso	Conc. Atom. % atom.	Erro Sigma % peso
Carbono-C	K- series	6.54	8.86	23.23	2.70
Oxigénio- O	K- series	19.30	26.15	51.44	6.72
Fósforo- P	K- series	8.46	11.46	11.64	1.06
Lantânio- La	L- series	12.24	16.58	3.76	1.08
Cério- Ce	L- series	21.89	29.65	6.66	1.85
Cálcio- Ca	K- series	0.61	0.83	0.65	0.13
Prata- Ag	L- series	4.14	5.60	1.63	0.47
Silício- Si	K- series	0.65	0.87	0.98	0.16
	Total	73.83	100.00	100.00	

Tal como seria de esperar, a monazite mostra um marcado enriquecimento em cério e lantânio (Fig. V.12b; Tabela V.6). Devido às semelhanças de raio iónico e de

número de coordenação entre o Ca^{2+} e as terras raras leves, o cálcio substitui frequentemente o Ce e o La na estrutura cristalina da monazite (Toledo *et al.* 2004), explicando, assim, os teores de cálcio encontrados nas análises deste mineral. Um aspecto digno de nota é o facto de se terem detectado picos de prata (Ag) em muitas das monazites estudadas, o que estará provavelmente relacionado com a presença de inclusões de uma fase mineral contendo este elemento químico.

(a) Espectro do cristal de rútilo P1r – amostra ZCF



(b) Espectro do cristal de monazite P3 – amostra ZCF

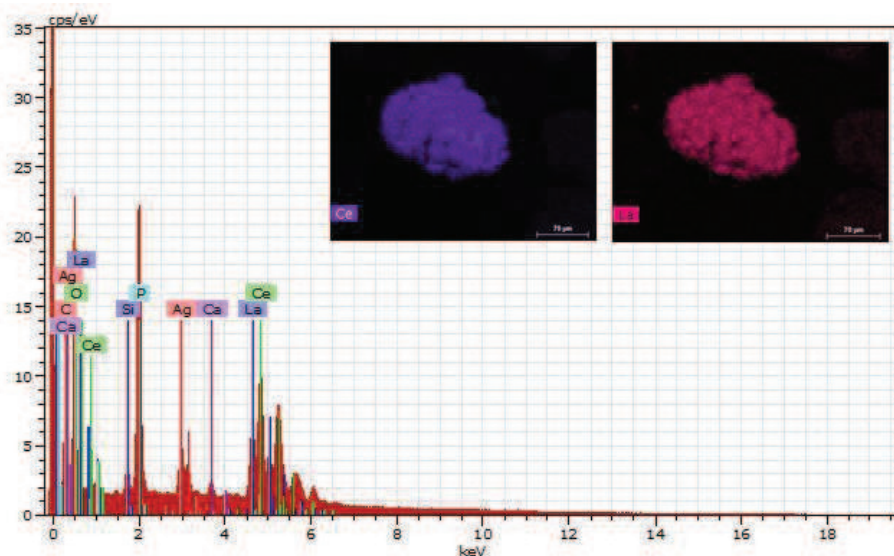


Figura V.12 Espectros MEV/EDS de cristais de rútilo e monazite da amostra ZCF (concentrado original). Titânio (laranja), cério (roxo), lantânio (rosa)

Quando se comparam as imagens MEV do concentrado original com as da fracção magnética obtida após passagem no separador de Frantz, a uma intensidade da corrente de 1,2 A, verifica-se que o número de cristais de monazite e de rútilo incorporado nesta fracção aumentou significativamente, embora o zircão continue a representar o mineral predominante (Fig. V.13).

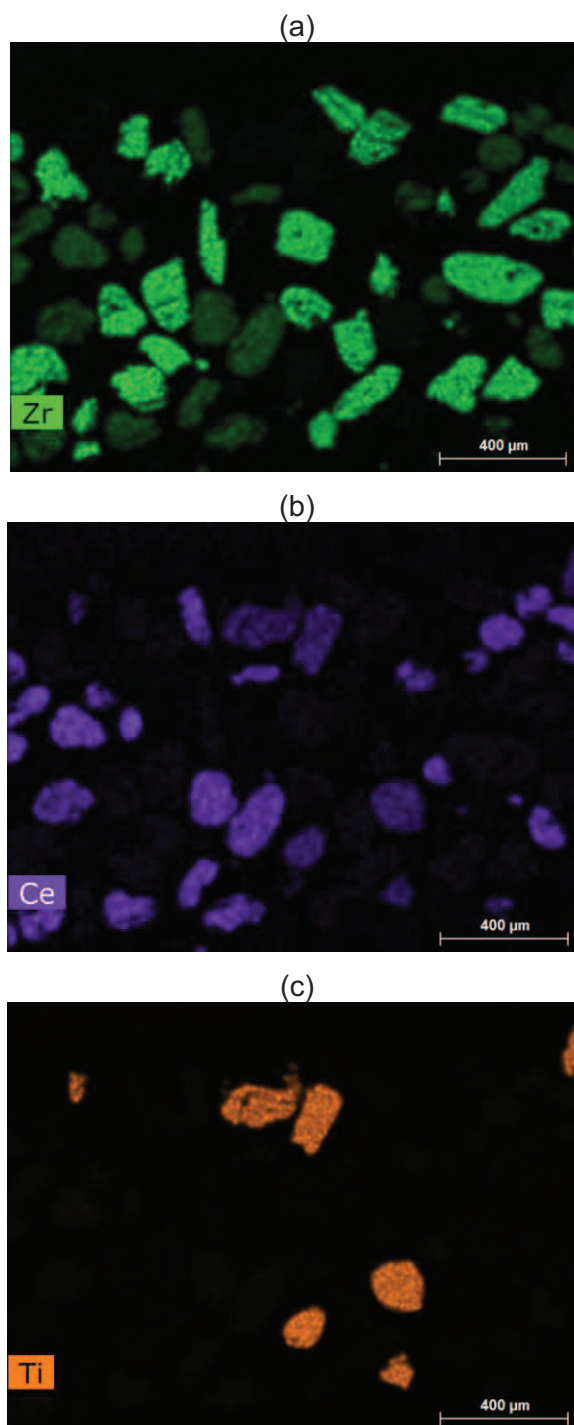


Figura V.13 Imagens MEV/EDS de cristais de zircão, monazite e rútilo na fracção magnética da amostra ZCF. Zircónio (verde), cério (roxo), titânio (laranja)

Pode concluir-se, por isso, que este esquema de separação permitiu isolar a monazite do zircão com melhores resultados do que o aplicado à amostra ZSG, em concordância com o que já tinha sido referido na secção V.5.

V.8. CONCLUSÕES

O trabalho realizado sobre as areias pesadas da jazida de Moma permitiu retirar as seguintes conclusões:

1. A região de Moma está localizada na Província de Nampula (16°30'S, 39°40'E) em terrenos de cobertura de idade Quaternária (Pleistocénico-Holocénico) que se dispõem segundo uma faixa alongada ao longo da linha de costa e estão limitados a oeste pelo cinturão móvel de Moçambique, formado durante a amalgamação do continente Gondwana por justaposição de blocos crustais Meso- e Neoproterozóicos.
2. Em termos geomorfológicos, os terrenos de idade Pleistocénico-Holocénico representados na área em estudo compreendem as seguintes unidades principais: (a) *Dunas Altas de Topuito e Tebani*, com uma elevação média de 100 m; (b) *Planície de Namalope* (baixo), apresentando uma topografia relativamente plana e uniforme; (c) *Planícies costeiras e estuarinas* correspondendo a áreas aplanadas envolvendo a Planície de Namalope e as Dunas Altas a norte, este e oeste e (d) *Dunas frontais*, constituídas por areias eólicas ocupando a faixa paralela à linha da costa
3. A actividade de exploração de minerais pesados (EHM) no distrito de Moma iniciou-se em 2007 com a extracção de areias nas cadeias de Dunas Altas de Topuito e Tebani, estando presentemente centrada no depósito de Namalope. A jazida, concessionada à empresa Kenmare Resources, tem reservas estimadas de aproximadamente 25 milhões de toneladas de ilmenite, 1,7 milhões de toneladas de zircão e 0,51 milhões de toneladas de rútilo e constitui um dos principais reservatórios de titânio e de zircónio do planeta.
4. Na jazida de Moma, a extracção das areias pesadas é feita essencialmente por dragagem a céu aberto num lago artificial de água doce, usando duas dragas aspiradoras - desagregadoras, ligadas por meio de cabos e bombas de sucção a um concentrador húmido flutuante ("WCP"), onde se processa a primeira fase de separação granulométrica e a obtenção de concentrados de minerais pesados ("HMC") através de métodos gravíticos. Em seguida, os concentrados "HMC" são transferidos para a Unidade de Separação Mineral ("MSP"). Após secagem,

concentra-se a ilmenite (fracção magnética) através de uma separação magnética de baixo campo. A fracção não magnética obtida neste processo é submetida então a uma separação electrostática para isolar o rútilo (condutor) da fracção não condutora (rica em zircão). Esta fracção é sujeita a uma separação por densidade em mesas vibratórias e a uma nova separação electrostática para produzir os concentrados finais de zircão.

5. A investigação realizada no âmbito da presente dissertação incidiu em quatro amostras de concentrados de zircão fornecidos pela empresa e teve como principal objectivo caracterizar os minerais pesados existentes nestas fracções, recorrendo a técnicas de separação magnética, gravimétrica, difracção de Raios X e microscopia electrónica de varrimento. O estudo desenvolvido revelou que o zircão é o constituinte dominante em todas as amostras analisadas, seguido pelo rútilo e pela monazite, o que indica que os processos de purificação levados a cabo na empresa são extremamente eficientes e permitem remover quase completamente a ilmenite e grande parte do rútilo. Devido á sua elevada densidade e baixa condutividade, a monazite tende a acompanhar o zircão em todas as etapas de separação e acaba por ficar retida na fracção rica em zircão.
6. Para separar o zircão da monazite aplicaram-se dois esquemas de separação. O primeiro foi usado apenas numa amostra (ZSG) e incluiu a passagem por líquidos densos (bromofórmio e iodeto de metileno) e a separação magnética a diferentes amperagens e inclinações laterais de calha, tendo-se verificado que a monazite foi preferencialmente removida na fracção magnética obtida numa das fases iniciais do procedimento (a uma intensidade de corrente de 0,5 A) em vez de se concentrar na fracção magnética recolhida a intensidades superiores ($> 0,7$ A). No segundo esquema de separação, as quatro amostras cedidas pela empresa foram sujeitas a uma separação magnética no separador de Frantz, a uma intensidade de campo de 1,2 A, inclinação vertical da calha de 15° e lateral de 6° , constatando-se que a monazite foi isolada, com melhores resultados do que no procedimento anterior, na fracção magnética recolhida nestas condições.
7. Os dados de difracção de raios X demonstram que o zircão é a fase mineralógica principal nas amostras estudadas e confirmam que o esquema de separação aplicado à amostra ZSG não permitiu separar eficientemente a monazite do zircão.
8. As análises obtidas no microscópio electrónico de varrimento mostram que os cristais de zircão presentes nas amostras estudadas contêm teores relativamente

altos de fósforo, sugerindo que este elemento químico possa estar a substituir o silício na estrutura cristalina do zircão. Embora com carácter muito subordinado, identificaram-se também alguns cristais de rútilo e de monazite nas amostras analisadas. Para além de titânio e oxigénio, os cristais de rútilo apresentam, em geral, picos no nióbio e no ferro de amplitude variável, o que é comum nesta fase mineral. Tal como seria de esperar, a monazite é caracterizada por um marcado enriquecimento em cério e lantânio. Um aspecto digno de nota é o facto de se terem detectado picos de prata (Ag) em muitas das monazites estudadas, o que estará provavelmente relacionado com a presença de inclusões de uma fase mineral contendo este elemento químico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- Addad, J.E. (2001). Minerais pesados: uma ferramenta para prospecção, proveniência, paleogeografia e análise ambiental. São Paulo: Edição independente. 81pp.
- Afonso, R.S. & Marques, J.M. (1993). Recursos Minerais da República de Moçambique: contribuição para o seu conhecimento. Instituto de Investigação Científica Tropical Lisboa, Direcção Nacional de Geologia de Moçambique, Lisboa, 149 pp.
- Beiersdorf, H., Kudrass, H-R., Stackelberg, U. von (1980). Placer Deposits of ilmenite and zircon on the Zambezi Shelf. *Geologisches Jahrbuch Reihe*, D36, 5-88.
- Bingen, B., Jacobs, J., Viola, G., Henderson, I.H.C., Skår, Ø., Boyd, R., Thomas, R.J., Solli, A., Key, R.M., Daudi, E.X.F. (2009). Geochronology of the Precambrian crust in the Mozambique belt in NE Mozambique and implications for Gondwana assembly. *Precambrian Research* 170, 231–255.
- Boyd, R., Nordgulen, O., Thomas, R.J. + outros 23 (2010). The geology and geochemistry of the East African Orogen in northeastern Mozambique. *South African Journal of Geology*, 113, 87–129.
- Cylek, V. (1981-1982). Geology and development of heavy mineral deposits in coastal Mozambique. Relatório Inédito, 1187, ING, Maputo.
- Dana, J.D. & Hurlbut, W. (1983). Manual de mineralogia. Livros Técnicos e Científicos Editora, S.A., Rio de Janeiro - São Paulo: 642 pp
- Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J. (2000). Minerais constituintes das rochas. 2ª edição. Carlos António Regêncio Macedo (trad.). Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian: 727 pp.
- Dias, J. (2004). A análise sedimentar e o conhecimento dos sistemas marinhos. Uma introdução à oceanografia geológica. Livro electrónico consultado em 05-08-2014 no endereço http://w3.ualg.pt/~jdias/JAD/eb_Sediment.html.
- Emmel, B., Kumar, R., Ueda, K., Jacobs, J., Daszinnies, M.C., Thomas, R.J., Matola, R. (2011). Thermochronological history of an orogen-passive margin system: An example from northern Mozambique, *Tectonics*, 30: 1-21.
- Engvik, A.K., Tveten, E., Bingen, B., Viola, G., Erambert, M., Feito, P., de Azavedo, S. (2007). P–T–t evolution and decompression textures of Pan-African high-pressure granulites, Lurio Belt, northeastern Mozambique. *Journal of Metamorphic Geology*, 25: 935–952.
- Hanson, R.E. (2003). Proterozoic geochronology and tectonic evolution of southern Africa. In: Yoshida, M., Windley, B.F., Dasgupta, S. (Eds). *Proterozoic East Gondwana: Supercontinent assembly and breakup*. Geological Society of London Special Publications, 206: 427–463.
- Hoffman, P.F. (1991). On accretion of granite-greenstone terranes. In: Robert, F., Shean, P.A., Green, S.B. (Eds). *Nuna Conference on Greenstone Gold and Crustal Evolution, Val D'Or*. Geological Association of Canada Special Publications, 32-45.

- Hoffman, P.F. (1992). Global Grenvillian kinematics and fusion of the Neoproterozoic supercontinent Rodinia. Geological Association of Canada. Program with abstracts, v. 17, 49.
- Hedrick, J.B. (2001). Zirconium and Hafnium. United States Geological Survey. Minerals yearbook, 86 pp
- Holmes, A., 1951. The sequence of Pre-Cambrian orogenic belts in South and Central Africa. In: Sandford, K.S., Blondel, F. (Eds.), Proceedings of the 18th International Geological Congress. Association des Services Géologiques Africains, London, pp. 254–269.
- Gomes, C.S.F (1979). Raios X no Estudo de Materiais. Textos didáticos, Universidade de Aveiro, 209 pp.
- Grantham, G.H., Storey, B.C., Thomas, R.J., Jacobs, J. (1997). The break-up position of Haag Nunataks within Gondwana: possible correlations in Natal and Dronning Maud Land. In: Ricci, C.A. (Eds). The Antarctic Region: Geological Evolution and Processes. Proceedings of the VII International Symposium of Antarctic Earth Sciences, Siena, 13-20.
- Grantham G.H., Macey P., Ingram, B.A., Cronwright M. (2004). Karoo-age andesitic volcanism along the northern Mozambique Coast. Gondwana Research, 7, pt 4 supplementary issue, 1303-1304.
- Grantham, G.H., Macey, P., Ingram, B.A., Rademeyer, M., Eglington, B., Keidan, H., Azevedo, S. (2005). The chemistry and age of Karoo-age andesitic lavas along the northern Mozambique coast, in: Gondwana 12, Pankhurst, R.J. e Veiga, G.D. (Eds), Mendoza, Argentina, p. 183.
- Grantham, G.H., Macey, P.H., Ingram, B.A., Roberts, M.P., Rohwer, M., Opperman, R., Manhica, V., Alvares, S., Bacalhau, C., Du Toit, M.C., Cronwright, M., Thomas, R.J. (2007). Map Explanation of Sheets Meconte (1439) and Nacala (1440). National Directorate of Geology, Republic of Mozambique, 240 pp.
- Jacobs, J., Thomas, R.J., Weber, K. (1993). Accretion and indentation tectonics at the southern edge of the Kaapvaal craton during the Kibaran (Grenville) orogeny. Geology, 21, 203-206.
- Jacobs, J., Bingen, B., Thomas, R.J., Bauer, W., Wingate, M., Feitio, P. (2008a). Early Palaeozoic orogenic collapse and voluminous late-tectonic magmatism in Dronning Maud Land and Mozambique: insights into the partially delaminated root of the East African-Antarctic Orogen? In: Geodynamic evolution of East Antarctica: a key to the East-West Gondwana connection (M. Satish-Kumar *et al.*, Eds.). Geological Society London Special Publications, 308: 69–90.
- Jacobs, J., Pisarevsky, S., Thomas, R.J., Becker, T. (2008b). The Kalahari Craton during the assembly and dispersal of Rodinia. Precambrian Research 160: 142–158.
- Kenmare Resources (2012). Annual report and accounts 2012, 100 pp. Consultado em 25-07-2014 no endereço <http://www.kenmareresources.com>.
- Key, R.M., Smith, R.A., Smelror, M., Powell, J.H, Thorsnes, T. Njange, F., Saether, O.M., Zandamela, E.B. (2008). Revised lithostratigraphy of the Mesozoic–Cenozoic succession of the onshore Rovuma Basin, northern coastal Mozambique. Journal of African Earth Sciences 111: 89–108.

- Kröner, A., Sacchi, R., Jaeckel, P., Costa, M. (1997). Kibaran magmatism and Pan-African granulite metamorphism in northern Mozambique: single zircon ages and regional implications. *Journal of African Earth Sciences* 25: 467–484.
- Macey, P.H., Ingram, B.A., Cronwright, M.S., Botha, G.A., Roberts, M.R., Grantham, G.H., Maree, L.P., Botha, P.M.W., Kota, M., Opperman, R., Haddon, I.G., Nolte, J.C., Rower, M., (2007). Map Explanation of Sheets Alto Molócuè (1537), Murrupula (1538), Nampula (1539), Mogincual (1540), Errego (1637), Gilé (1638) and Angoche (1639-40). National Directorate of Geology, Republic of Mozambique, 402 pp.
- Macey, P.H., Thomas, R.J., Grantham, G.H., Ingram, B.A., Jacobs, J., Armstrong, R.A., Roberts, M.P., Bingen, B., Hollick, L., de Kock, G., Viola, G., Bauer, W., Gonzales, E., Bjerkgård, T., Henderson, I.H.C., Sandsteg, J.S., Cronwright, M.S., Harley, S., Solli, A., Nordgulen, Ø., Motuza, G., Daudi, E.X.F., Manhiça, V. (2010). Mesoproterozoic geology of the Nampula Block, northern Mozambique: Tracing fragments of Mesoproterozoic crust in the heart of Gondwana. *Precambrian Research*, 182: 124-148.
- Macey, P.H., Miller, J.A., Rowe, C.D., Grantham, G.H., Siegfried, P., Armstrong, R.A., Kemp, J., Bacalau, J. (2013). Geology of the Monapo Klippe, NE Mozambique and its significance for assembly of central Gondwana. *Precambrian Research*, 233: 259-281.
- Manninen, T., Eerola, T., Mäkitie, H., Vuori, S., Luttinen, A., Sérvano, A., Manhiça, V. (2008). The Karoo volcanic rocks and related intrusions in southern and central Mozambique. Geological Survey of Finland, Special Paper 48, 211–250, 34.
- Miners, A. (2011). Placer gold mining. Consultado em 30/07/2014 no endereço <http://miningeducation.blogspot.pt/2011/11/placer-gold-mining.html>, .
- Moores, E.M. (1991). Southwest U.S. – East Antarctic (SWEAT) connection: a hypothesis. *Geology*, 19: 425-428.
- Morton, A.C. (1985). Heavy minerals in provenance studies. In: G.G. Zuffa (ed.), *Provenance of arenites*. Boston: D. Reidel Publishing Company: 249-277.
- Morton, A.C. (1991). Geochemical studies of detrital heavy minerals and their application to provenance research. *Geological Society of London Special Publications*, 57: 31-45.
- Morton, A.C. & Hallsworth, C.R. (1994). Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones. *Sedimentary Geology*, 90: 241-256.
- Norconsult Consortium (2007). Mineral Resources Management Capacity Building Project, Republic of Mozambique. Component 2: Geological Infrastructure Development Project, Geological Mapping Lot 1. Sheet Explanation: 32 Sheets; Scale: 1/250000, Report No. B6.f. National Directorate of Geology, Republic of Mozambique.
- Pacheco, J.T. (1962). Mineralogia das areias ilmeníticas radioactivas de Pebane (Moçambique). Estudos Científicos oferecidos em homenagem ao Prof. Doutor J. Carrington da Costa, Junta de Investigações do Ultramar, Lisboa, 109-125.
- Pettitjohn, J., Potter, P. & Siever, R. (1987). *Sand and sandstone*. Springer Verlag, New York, 553 pp.
- Roberts, M.P., Grantham, G.H., Cronwright, M.S., Sacchi, R., Ingram, B.A., Azevedo, S., Walliser, A., August, R.B. (2005). Preliminary pressure temperature determinations on granulite-facies rocks of the Mugeba Klippe, north central Mozambique. In: Abstract, GEO2005, Durban, South Africa, 4–7 July, p. 84.

- Romans, P.A., Brown, L.L., White, J.C. (1975). An electron microprobe study of Yttrium, Rare Earth and Phosphorus distribution in zoned and ordinary zircon. *American Mineralogist*, 60: 475-480
- Salman, G., Abdula, I. (1995). Development of the Mozambique and Ruvuma sedimentary basins, offshore Mozambique, *Sediment. Geol.*, 96: 7–41.
- Smelror, M., Key, R.M. Smith, R.A., Njange F. (2008). Late Jurassic and Cretaceous palynostratigraphy of the onshore Rovuma Basin, northern Mozambique, *Palynology*, 32: 63–76.
- Silva & Joanito. (2014). Mapa tectônico da África Austral, 220pp.
- Suguio, K. (1973). *Introdução à Sedimentologia*. São Paulo: Edgard Blücher e Editora da USP. 317 pp.
- Suguio, K. (1980). *Rochas sedimentares*. São Paulo: Editora Blücher, 500 pp
- Suguio, K. (2003). *Geologia sedimentar*. São Paulo: Editora Blücher, 400 pp
- Thomas, R.J., Jacobs, J., Horstwood, M.S.A, Ueda, K., Bingen, B., Matola, R. (2010). The Mecubúri and Alto Benfica Groups, NE Mozambique: Aids to unravelling ca. 1 and 0.5 Ga events in the East African Orogen. *Precambrian Research*, 178: 72-90.
- Toledo, M.C.M., Oliveira, S.M.B., Fontan, F., Ferrari, V.C. & Parceval, P. (2004). Mineralogia, morfologia e cristalquímica da monazite de Catalão I (GO, Brasil). *Revista Brasileira de Geociências*, 34(1):135-146
- Tyler, R.M., Minnitt, R.C.A. (2004). A review of sub-Saharan heavy mineral sand deposits: implications for new projects in southern Africa. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 89-99.
- Wareham, C.D., Pankhurst, R.J., Thomas, R.J., Storey, B.C., Grantham, G.H., Jacobs, J., Eglinton, B.M. (1998). Pb, Nd and Sr isotope mapping of Grenville-age Crustal Provinces in Rodinia. *J. Geol.*, 106: 647-659.

Endereços WEB consultados:

http://geology.uprm.edu/Morelock/9_image/placenv.jpg, consultado em 30/07/2014

<http://www.kenmareresources.com/operations/summary-of-operations.aspx>, consultado em 29/07/2014

Kenmare Resources (2012). Annual report and accounts 2012, 100 pp. Consultado em 25-07-2014 no endereço <http://www.kenmareresources.com>.